



**Repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión, mediante la aplicación de ingeniería inversa en la empresa FAME S.A. del cantón Rumiñahui, Provincia de Pichincha.**

Gualán Guamán, José Armando y Ortiz Bunci Santiago Misael

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.

Ing. Caizalitin Quinaluisa, Edwin Alejandro M.Sc

Viernes 18 de agosto de 2023

Latacunga

## Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de contenido

### TESIS\_GUALAN\_ORTIZ B1.docx

#### Scan details

Scan time:  
August 14th, 2023 at 16:12 UTC

Total Pages:  
88

Total Words:  
21907

#### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	0.9%	192
Minor Changes	0.1%	25
Paraphrased	1.7%	380
Omitted Words	0%	0

#### AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	4.8%	638
Human text	95.2%	12576

[Learn more](#)

#### Plagiarism Results: (52)

desarrollo+de+un+algoritmo+comandos+de+voz.pdf 0.5%

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/105030...>

subaru

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO CENTRO UNIVERSITARIO  
UAEM ECATEPEC TITULO DEL TRABAJO: DESARROLLO DE UN ALGORITMO D...

EN 12770 Calzado, métodos de prueba para suelas, ... 0.4%

<https://www.laboratuar.com/es/testler/urun-yeterlilig-testler...>

+90 212 702 30 00 | +90 212 702 00 00 | [email protected] | PRUEBAS ...

La revolución de la visión artificial: Transformando ... 0.3%

<https://es.linkedin.com/pulse/la-revoluci%3fb3n-de-vis%3...>

Gustavo Pino Avegno

...

.....  
**Ing. Caizalitin Quinaluisa, Edwin Alejandro M.Sc**  
**Director**



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

### Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: “Repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión, mediante la aplicación de ingeniería inversa en la empresa FAME S.A. del cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha” fue realizado por los señores **Gualán Guamán, José Armando y Ortiz Bunci, Santiago Misael**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 18 de agosto de 2023

Ing. Caizalitin Quinaluisa, Edwin Alejandro M.Sc

C. C.: 0503351397



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica  
Carrera de Mecatrónica

### Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Gualán Guamán, José Armando**, con cedula de ciudadanía n° 1900848852 y **Ortiz Bunci, Santiago Misael**, con cedula de ciudadanía n° 0503872095 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión, mediante la aplicación de ingeniería inversa en la empresa FAME S.A. del cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 18 de agosto de 2023

.....  
**Gualán Guamán, José Armando**

C. C.: 1900848852

.....  
**Ortiz Bunci, Santiago Misael**

C. C.: 0503872095



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

**Autorización de Publicación**

Nosotros, **Gualán Guamán, José Armando**, con cedula de ciudadanía n° 1900848852 y **Ortiz Bunci, Santiago Misael**, con cedula de ciudadanía n° 0503872095 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión, mediante la aplicación de ingeniería inversa en la empresa FAME S.A. del cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 18 de agosto de 2023

.....  
**Gualán Guamán, José Armando**

C. C.: 1900848852

.....  
**Ortiz Bunci, Santiago Misael**

C. C.: 0503872095

**Dedicatoria**

*A mi familia, mis padres y hermanos.*

*Gualán Guamán, José Armando*

## Dedicatoria

*Consagro mi logro a mis progenitores, Segundo Rafael y Leonor Agustina, quienes, desde mi temprana edad siempre me alentaron a perseguir mis metas y han sido una fuente de motivación para superarme. Me siento muy orgulloso de tener a ustedes como mis padres ya que sin su ayuda no podría haber culminado mi carrera.*

*A mi hermano, Héctor Marcelo, por ser el primer profesional de la familia. Siempre hemos estado los dos juntos y me siento orgulloso que eres el último y el primero en dar esa alegría a mis padres.*

*A mi amada Elizabeth, por ser mi compañera de lucha durante esta larga trayectoria. Quiero expresar mi profundo agradecimiento por su paciencia, apoyo y los momentos felices que vivimos compartiendo juntos desde el comienzo que nuestra pequeña familia dio sus primeros pasos.*

*Y una dedicatoria muy especial para mi pequeño campeón, Antony Mateo, quien fue una razón más para culminar este logro, a través de esta tesis quiero expresar el gran cariño que te tengo y destacar lo crucial que eres en mi vida.*

*Ortiz Bunci, Santiago Misael*

## **Agradecimiento**

*Agradezco a mis padres por todo el apoyo brindado a lo largo de mi vida estudiantil, que a pesar de las circunstancias siempre me animaron a perseguir mis metas académicas.*

*Agradezco a esas personas que de alguna manera me alentaron a tratar de ser una mejor persona: docentes, compañeros y conocidos.*

*Gualán Guamán, José Armando*

## **Agradecimiento**

*Quiero expresar mi agradecimiento, en primera instancia, a Dios por todas las bendiciones que han llegado a mi vida. Mi gratitud a mis padres por su apoyo total, su perseverancia y palabras de ánimo que me impulsaron a seguir en los momentos más difíciles. También agradezco a mi amada Elizabeth por su cariño y apoyo incondicional. Ha sido una mujer valiosa en mi vida, brindándome su compañía y alentándome a seguir adelante en todo momento.*

*A todos mis amigos, quienes han sido compañeros nobles a lo largo de mi vida y han brindado su apoyo, su amistad que ha enriquecido mi existencia les dedico mis más sinceros agradecimientos.*

*A mi tutor de tesis, el Ing. Edwin Caizalitín, por brindarme su apoyo total y demostrar un legítimo interés en mi proyecto. Su aliento, su guía teórica y metodológica fueron fundamentales durante todo el desarrollo del trabajo.*

*A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, por brindarme todo el conocimiento que he adquirido durante estos años. A mis docentes quienes han contribuido fogosamente a mi formación profesional, aportando su grano de arena. Su apoyo y conocimiento compartido ha sido primordial para alcanzar la culminación de mi paso por la Universidad, y estoy intensamente agradecido por ello.*

*Ortiz Bunci, Santiago Misael*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenidos.....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de autoría .....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria.....	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenidos .....	10
Índice de figuras .....	15
Índice de tablas .....	19
Resumen.....	21
Abstract.....	22
Capítulo I: Generalidades .....	23
Introducción.....	23
Antecedentes.....	23
Planteamiento del problema.....	28
Descripción resumida del proyecto .....	30
Objetivos.....	37
Objetivo general.....	37

	11
Objetivos específicos .....	38
Hipótesis .....	38
Variables de investigación.....	38
Variable Independiente.....	38
Variable Dependiente.....	38
Capítulo II: Fundamentación teórica .....	39
Ingeniería Inversa.....	39
Materia prima: El cuero .....	40
Partes de la piel bovina .....	40
Curtido de pieles.....	41
Clasificación de pieles.....	41
Máquinas universales de ensayos .....	42
Abrasímetro.....	42
Flexómetro .....	43
Elastómetro .....	44
Normas y Estándares .....	44
Norma ISO 9001 .....	44
Norma ISO 20871 .....	44
Norma ISO 5402 .....	47
Norma ISO 3379 .....	50
Python.....	52

	12
<b>Visión artificial.....</b>	<b>53</b>
<b>Tratamiento de imágenes .....</b>	<b>53</b>
<b>Interfaz Humano- Máquina (HMI).....</b>	<b>54</b>
<b>Sensores y actuadores .....</b>	<b>55</b>
<b>Sensores .....</b>	<b>55</b>
<b>Clasificación de sensores .....</b>	<b>56</b>
<b>Sensores de Fuerza .....</b>	<b>57</b>
<b>Actuadores .....</b>	<b>58</b>
<b>Microprocesadores y Microcontroladores .....</b>	<b>60</b>
<b>Microcontroladores .....</b>	<b>60</b>
<b>Microprocesadores.....</b>	<b>60</b>
<b>Sistema embebido .....</b>	<b>67</b>
<b>Capítulo III: Diseño y construcción .....</b>	<b>69</b>
<b>Diseño de los sistemas .....</b>	<b>69</b>
<b>Necesidades del cliente.....</b>	<b>69</b>
<b>Especificaciones técnicas del sistema .....</b>	<b>71</b>
<b>Casa de calidad.....</b>	<b>72</b>
<b>Ingeniería inversa.....</b>	<b>75</b>
<b>Generación de conceptos.....</b>	<b>79</b>
<b>Diseño de concepto para el abrasímetro .....</b>	<b>79</b>
<b>Diseño de concepto para el flexómetro.....</b>	<b>81</b>
<b>Diseño de concepto para el elastómetro.....</b>	<b>81</b>

<b>Diseño de detalle</b> .....	<b>85</b>
<b>Abrasímetro: diseño mecánico</b> .....	<b>86</b>
<b>Abrasímetro: diseño eléctrico y electrónico</b> .....	<b>91</b>
<b>Abrasímetro: diseño del programa de control</b> .....	<b>92</b>
<b>Flexómetro: diseño mecánico</b> .....	<b>93</b>
<b>Flexómetro: diseño eléctrico y electrónico</b> .....	<b>95</b>
<b>Flexómetro: diseño del programa del microcontrolador</b> .....	<b>96</b>
<b>Elastómetro: diseño mecánico</b> .....	<b>97</b>
<b>Elastómetro: diseño eléctrico</b> .....	<b>104</b>
<b>Elastómetro: programación de la Interfaz Humano Máquina</b> .....	<b>108</b>
<b>Integración de sistemas</b> .....	<b>113</b>
<b>Construcción de los sistemas</b> .....	<b>115</b>
<b>Estructura mecánica del sistema</b> .....	<b>116</b>
<b>Instalación del sistema electrónico</b> .....	<b>118</b>
<b>Instalación del sistema de reconocimiento de grietas</b> .....	<b>119</b>
<b>Capítulo IV: Pruebas y resultados</b> .....	<b>121</b>
<b>Pruebas de funcionamiento y resultados</b> .....	<b>122</b>
<b>Pruebas de detección</b> .....	<b>122</b>
<b>Análisis de precisión del sensor</b> .....	<b>127</b>
<b>Validación del sistema</b> .....	<b>128</b>
<b>Pruebas mediante ensayo automático</b> .....	<b>129</b>
<b>Prueba mediante ensayo manual</b> .....	<b>130</b>

<b>Validación de hipótesis.....</b>	<b>133</b>
<b>Análisis de costos.....</b>	<b>136</b>
<b>Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>138</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>138</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>139</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>141</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>147</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Flexómetro modelo TF116</i> .....	25
<b>Figura 2</b> <i>Probador de abrasión Taber: modelo TSE-A016</i> .....	25
<b>Figura 3</b> <i>Esquema del brazo giratorio del abrasímetro</i> .....	31
<b>Figura 4</b> <i>Esquema regulador de distancia</i> .....	32
<b>Figura 5</b> <i>Esquema de recorrido del brazo giratorio</i> .....	33
<b>Figura 6</b> <i>Contador de ciclos de abrasímetro</i> .....	33
<b>Figura 7</b> <i>Esquema de las mordazas</i> .....	34
<b>Figura 8</b> <i>Posición del contador de ciclos del flexómetro</i> .....	35
<b>Figura 9</b> <i>Estado actual del elastómetro</i> .....	36
<b>Figura 10</b> <i>Esquema del elastómetro</i> .....	36
<b>Figura 11</b> <i>Esquema gráfico del método de ingeniería inversa</i> .....	39
<b>Figura 12</b> <i>Piel de cuero de vaca</i> .....	40
<b>Figura 13</b> <i>Partes de la piel bovina</i> .....	40
<b>Figura 14</b> <i>Máquina abrasímetro de tambor</i> .....	43
<b>Figura 15</b> <i>Flexion Bally GT-KC10A</i> .....	43
<b>Figura 16</b> <i>Elastrómetro electrónico</i> .....	44
<b>Figura 17</b> <i>Procedimiento de colocación de muestras</i> .....	48
<b>Figura 18</b> <i>Interacción HMI</i> .....	55
<b>Figura 19</b> <i>Clasificación de los sensores de acuerdo al principio de transducción</i> .....	56
<b>Figura 20</b> <i>Distribución de sensores según la variable física a medir</i> .....	57
<b>Figura 21</b> <i>Celda de carga</i> .....	58
<b>Figura 22</b> <i>Clasificación de los actuadores</i> .....	58

<b>Figura 23</b> <i>Motor a pasos Nema 17</i> .....	60
<b>Figura 24</b> <i>Raspberry Pi 4</i> .....	61
<b>Figura 25</b> <i>Especificaciones técnica Raspberry Pi 4</i> .....	62
<b>Figura 26</b> <i>Medidas de una Raspberrypi 4 Model B</i> .....	63
<b>Figura 27</b> <i>Pantalla para Raspberry Pi</i> .....	64
<b>Figura 28</b> <i>Microscopio digital Usb</i> .....	65
<b>Figura 29</b> <i>Driver A4988</i> .....	66
<b>Figura 30</b> <i>Dispositivos de los sistemas embebidos</i> .....	68
<b>Figura 31</b> <i>Casa de la calidad correspondiente al abrasímetro</i> .....	73
<b>Figura 32</b> <i>Casa de la calidad correspondiente al flexómetro</i> .....	74
<b>Figura 33</b> <i>Casa de la calidad correspondiente al elastómetro</i> .....	75
<b>Figura 34</b> <i>Modelo 3D del abrasímetro</i> .....	76
<b>Figura 35</b> <i>Esquema eléctrico del abrasímetro</i> .....	76
<b>Figura 36</b> <i>Modelo 3D del flexómetro</i> .....	77
<b>Figura 37</b> <i>Esquema eléctrico del flexómetro</i> .....	78
<b>Figura 38</b> <i>Modelo 3D del elastómetro</i> .....	78
<b>Figura 39</b> <i>Opciones para la implementación de visión artificial</i> .....	84
<b>Figura 40</b> <i>Diagrama de funcionamiento del elastómetro</i> .....	85
<b>Figura 41</b> <i>Diseño mecánico de mejoras en el abrasímetro</i> .....	86
<b>Figura 42</b> <i>Diagrama de tornillo de potencia</i> .....	86
<b>Figura 43</b> <i>Factor de seguridad (brazo del abrasímetro)</i> .....	89
<b>Figura 44</b> <i>Gráfico de esfuerzos (brazo del abrasímetro)</i> .....	89
<b>Figura 45</b> <i>Gráfico de deformaciones (brazo del abrasímetro)</i> .....	90

<b>Figura 46</b> <i>Área de presión (brazo del abrasímetro)</i> .....	90
<b>Figura 47</b> <i>Diagrama eléctrico (abrasímetro)</i> .....	92
<b>Figura 48</b> <i>Código fuente del programa en Arduino (abrasímetro)</i> .....	93
<b>Figura 49</b> <i>Análisis de deformaciones en piezas originales (elastómetro)</i> .....	94
<b>Figura 50</b> <i>Análisis de deformaciones en piezas rediseñadas (flexómetro)</i> .....	94
<b>Figura 51</b> <i>Factor de seguridad en piezas rediseñadas (flexómetro)</i> .....	95
<b>Figura 52</b> <i>Diagrama del circuito de control (flexómetro)</i> .....	96
<b>Figura 53</b> <i>Código fuente del programa en Arduino (flexómetro)</i> .....	96
<b>Figura 54</b> <i>Acoplamiento de motor: opción A (elastómetro)</i> .....	97
<b>Figura 55</b> <i>Acoplamiento de motor: opción B (elastómetro)</i> .....	98
<b>Figura 56</b> <i>Acoplamiento de motor: opción C (elastómetro)</i> .....	99
<b>Figura 57</b> <i>Diagrama S-N de aceros</i> .....	102
<b>Figura 58</b> <i>Deformaciones en elementos de transmisión</i> .....	102
<b>Figura 59</b> <i>Factor de seguridad en elementos de transmisión</i> .....	103
<b>Figura 60</b> <i>Acondicionamiento del sensor de fuerza (Celda de carga)</i> .....	104
<b>Figura 61</b> <i>Distribución de pines GPIO</i> .....	105
<b>Figura 62</b> <i>Resistencias (Rcs) de ajuste del driver A4988</i> .....	105
<b>Figura 63</b> <i>Circuito de conexión del driver A4988</i> .....	107
<b>Figura 64</b> <i>Diseño de HMI</i> .....	109
<b>Figura 65</b> <i>Código fuente del HMI</i> .....	110
<b>Figura 66</b> <i>Diagrama de bloques del sistema</i> .....	113
<b>Figura 67</b> <i>Fuente Dual</i> .....	114
<b>Figura 68</b> <i>Modelo 3D de sistema mejorado</i> .....	115

<b>Figura 69</b> <i>Parámetros de impresión 3D</i> .....	116
<b>Figura 70</b> <i>Estructura</i> .....	116
<b>Figura 71</b> <i>Componentes internos</i> .....	117
<b>Figura 72</b> <i>Estructura mecánica final</i> .....	117
<b>Figura 73</b> <i>Instalación de componentes electrónicos</i> .....	118
<b>Figura 74</b> <i>Conexión de componentes electrónicos</i> .....	118
<b>Figura 75</b> <i>Configuración inicial</i> .....	119
<b>Figura 76</b> <i>Interfaz de usuario</i> .....	120
<b>Figura 77</b> <i>Partes del elastómetro mejorado</i> .....	121
<b>Figura 78</b> <i>Prueba 1 de detección</i> .....	122
<b>Figura 79</b> <i>Prueba 2 de detección</i> .....	123
<b>Figura 80</b> <i>Prueba 3 de detección</i> .....	123
<b>Figura 81</b> <i>Prueba 4 de detección</i> .....	124
<b>Figura 82</b> <i>Prueba 5 de detección</i> .....	124
<b>Figura 83</b> <i>Prueba 6 de detección</i> .....	125
<b>Figura 84</b> <i>Prueba 7 de detección</i> .....	126
<b>Figura 85</b> <i>Prueba 8 de detección</i> .....	126
<b>Figura 86</b> <i>Cálculo del coeficiente de variación</i> .....	127
<b>Figura 87</b> <i>Cálculo del promedio de tiempos de operación</i> .....	132
<b>Figura 88</b> <i>Selección del valor crítico</i> .....	135

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Pantalla touch 5 pulgadas para Raspberry Pi</i> .....	64
<b>Tabla 2</b> <i>Microscopio digital USB portátil</i> .....	65
<b>Tabla 3</b> <i>Driver A4988</i> .....	66
<b>Tabla 4</b> <i>Necesidades en el abrasímetro</i> .....	69
<b>Tabla 5</b> <i>Necesidades en el flexómetro</i> .....	70
<b>Tabla 6</b> <i>Necesidades en el elastómetro</i> .....	70
<b>Tabla 7</b> <i>Especificaciones técnicas del abrasímetro</i> .....	71
<b>Tabla 8</b> <i>Especificaciones técnicas del flexómetro</i> .....	71
<b>Tabla 9</b> <i>Especificaciones técnicas del elastómetro</i> .....	72
<b>Tabla 10</b> <i>Comparación de actuadores</i> .....	80
<b>Tabla 11</b> <i>Comparación de motores</i> .....	82
<b>Tabla 12</b> <i>Comparación de motores a paso</i> .....	87
<b>Tabla 13</b> <i>Configuración de micropasos</i> .....	106
<b>Tabla 14</b> <i>Selección de cámaras</i> .....	107
<b>Tabla 15</b> <i>Porcentaje de detección</i> .....	128
<b>Tabla 16</b> <i>Pruebas de duración del ensayo: Nobuck-Pliego1</i> .....	129
<b>Tabla 17</b> <i>Pruebas de duración del ensayo: Nobuck-Pliego2</i> .....	129
<b>Tabla 18</b> <i>Pruebas de duración del ensayo: Coyote-Pliego1</i> .....	129
<b>Tabla 19</b> <i>Pruebas de duración del ensayo: Coyote-Pliego2</i> .....	130
<b>Tabla 20</b> <i>Pruebas de ensayo manual: Nobuck-Pliego1</i> .....	131
<b>Tabla 21</b> <i>Pruebas de ensayo manual: Nobuck-Pliego2</i> .....	131
<b>Tabla 22</b> <i>Pruebas de ensayo manual: Coyote-Pliego1</i> .....	131

<b>Tabla 23</b> <i>Pruebas de ensayo manual: Coyote-Pliego2</i> .....	131
<b>Tabla 24</b> <i>Tabulación de datos de tiempo</i> .....	134
<b>Tabla 25</b> <i>Costos de los componentes</i> .....	136

## Resumen

Dados los avances tecnológicos que se han desarrollado hasta la actualidad, muchos de los equipos y máquinas usadas en la industria se están quedando obsoletas. Es por ello que la presente tesis se centra en la repotenciación de los equipos del laboratorio de control de calidad de la empresa FAME con el fin de mejorar la precisión y la eficiencia de las pruebas de fricción, elasticidad y distensión superficial, mediante automatización de los equipos en los que se llevan a cabo los ensayos. La hipótesis planteada es que la repotenciación y el mejoramiento del laboratorio de control de calidad mediante la automatización de los equipos de ensayo de fricción, elasticidad y flexión contribuirán significativamente a la optimización de las pruebas de control de calidad según las normativas requeridas por la industria. Para probar esta hipótesis, se ha realizado el diseño de los componentes mecánicos, eléctricos y de control que se integraran en el sistema mejorado, aplicando ingeniería inversa en las máquinas originales. Posteriormente, el diseño de detalle se ha llevado a cabo de manera concurrente entre diseñador y operador de las máquinas a repotenciar, de tal forma que los sistemas automatizados cumplan a cabalidad con las necesidades del cliente y las necesidades que exigen las normas internacionales de control de calidad. Debido a circunstancias fortuitas la fase de implementación ha sido redireccionada al prototipado funcional de una de las máquinas con sus respectivas mejoras, permitiendo de esta manera la obtención de datos con su respectivo análisis. Finalmente, tras realizar pruebas de funcionamiento se concluye que los datos obtenidos respaldan la hipótesis inicial, de manera que se reduce el tiempo de operación a un 30% del tiempo inicial demostrando que la repotenciación mediante la automatización de los equipos constituye una solución efectiva y eficiente.

*Palabras Clave:* Control de calidad, Elastómetro, Detección de grietas, Rotura de flor de piel

### **Abstract**

Determined by the technological advancements achieved to date, a significant portion of the industrial equipment and machinery has reached obsolescence. Consequently, this thesis is oriented towards the reinvigoration of the apparatus within FAME company's quality control laboratory. The primary objective is the amelioration of precision and efficiency in friction, elasticity, and superficial distension testing procedures via the integration of automated mechanisms into the test equipment. The underlying hypothesis posits that the reinvigoration and enhancement of the quality control laboratory through the automation of friction, elasticity, and flexion testing equipment will yield substantial enhancements to quality control testing, aligned with prevailing industrial regulations. To empirically validate this hypothesis, an iterative process of reverse engineering has been conducted on the original machinery, resulting in the design of intricately interwoven mechanical, electrical, and control components. This amalgamation, synthesized in the enhanced system, has been collaboratively refined between the designer and the machinery operator, ensuring full alignment with client requisites and international benchmarks stipulated by quality control standards. Owing to serendipitous contingencies, the implementation phase has been tactically redirected toward the functional prototyping of a singular machine, augmented with its respective enhancements. This strategic pivot has consequently enabled the acquisition of pertinent empirical data, subsequently subjected to comprehensive analysis. Ultimately, post functional tests, it becomes evident that the amassed data corroborates the initial hypothesis, with operational time being truncated to a mere 30% of its initial duration. This substantiates that the refurbishment strategy, executed via equipment automation, indeed represents a resoundingly efficacious and efficient solution.

*Keywords:* Quality Control, Elastomer, Crack Detection, Surface Breakage

## Capítulo I

### Generalidades

#### Introducción

En este primer capítulo se detalla cómo, la repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad en la Empresa FAME S.A. mediante la aplicación de ingeniería inversa y la automatización de las pruebas de fricción, elasticidad y distensión representan un paso importante hacia la optimización de los procesos de fabricación y el aseguramiento de la calidad de los productos. Esta iniciativa permitirá a la empresa destacarse en el mercado, mejorar la eficiencia de sus operaciones y garantizar la satisfacción de sus clientes.

#### Antecedentes

La empresa FAME S.A., que pertenece al Instituto de Seguridad Social de las Fuerzas Armadas (ISSFA), lleva más de 70 años desarrollando diseños y fabricando prendas de vestir, calzado y equipo para los distintos segmentos de seguridad y defensa nacional. FAME cuenta con un laboratorio para la verificación de los estándares de calidad bajo la norma ISO 9001 con enfoque hacia sus diferentes líneas de producción, entre ellas la línea de calzado. (FAME, 2022)

La norma ISO 9001 es una norma reconocida internacionalmente que define los requisitos básicos para establecer y gestionar un sistema de gestión de la calidad (SGC) dentro de una organización. Estos lineamientos se aplican a los procesos internos de la organización y se enfocan en la mejora continua con foco en la satisfacción del cliente. La implementación de este estándar permite a las organizaciones demostrar su compromiso con la calidad excepcional y el cumplimiento de los estándares internacionales. (ISO, 2016)

Para garantizar la calidad del producto final la empresa se basa en la calidad de la materia prima. Para ello, tomando como punto de interés la línea de calzado, en el laboratorio se realizan ensayos de flexión y distensión encaminados a determinar la

durabilidad del cuero y ensayos de resistencia a la abrasión para determinar la durabilidad del “caucho”, los cuales constituyen los elementos principales en la fabricación de calzado.

Para llevar a cabo el ensayo de fricción, la empresa FAME cuenta con un abrasímetro de tambor, su funcionamiento de basa en frotar una muestra de caucho sobre un tambor giratorio recubierto de una superficie abrasiva. La valoración de la resistencia al desgaste del caucho es determinada por el operario mediante la medición de la reducción de la muestra en un determinado número de revoluciones del tambor.

Por otra parte, FAME dispone de un elastómetro para las pruebas de distención mediante el método de “explosión de bola”, este método consiste en colocar una pieza de ensayo circular alrededor de su borde y se distiende gradualmente forzando una esfera metálica de acero, unida al extremo de un émbolo contra el centro de la pieza de ensayo en el reverso. El movimiento es proporcionado por el operador mediante una manivela.

El ensayo de flexión consiste en doblar una probeta y sujetar las muestras mediante mordazas en sus dos extremos, de las cuales la mordaza superior es móvil y la mordaza inferior fija. Posteriormente, la máquina realiza movimiento oscilatorio flexionando la muestra hasta un determinado número de ciclos.

En el mercado internacional existen fabricantes como: Testex, Aveno o IDM test, los cuales comercializan determinados equipos certificados para las diferentes pruebas de control de calidad cuyas características pueden variar en función de las necesidades de las empresas, pero sin entrar en conflicto con los requerimientos de la normativa ISO. Por ejemplo, el probador de flexibilidad de Bally modelo TF116 cuenta con 12 estaciones, lo cual resulta útil para el ensayo de múltiples muestras.

**Figura 1**

*Flexómetro modelo TF116*



*Nota.* En la figura 1 se visualiza la forma que debe tener el flexómetro, tomando en consideración del modelo. Tomado de *TF116 Probador de Flexibilidad de Bally* por (TESTEX Our Instruments , s.f.)

La empresa TST instrumentos, por su parte, es una empresa internacional que se dedica a la fabricación de máquinas de prueba para las diferentes áreas de la industria. En relación a la industria de cuero y textil, dispone de: probador de resistencia de grietas, probador de solidez al frote, probador de resistencia a la abrasión, probador de suavidad, entre otros. Los modelos de estas máquinas difieren en cierto grado a los probadores convencionales, aunque cumplen con la normativa en igual medida. (TESTEX Our Instruments , s.f.)

**Figura 2**

*Probador de abrasión Taber: modelo TSE-A016*



*Nota.* En la figura 2 se observa un modelo de máquina de abrasión. Tomado de *China Manufacturer for Lultcs Leather Abrasion Tester* por (TSTinstruments, s.f.)

FAME S.A., una empresa perteneciente al Estado Ecuatoriano a través del ISSFA, cuenta con 70 años de experiencia en la elaboración profesional de equipos de camping, calzado y vestuario exclusivamente destinados a las Fuerzas Armadas. Se destaca por su liderazgo en la producción de artículos de seguridad y protección, generando alrededor de 600,000 prendas y 120,000 artículos de equipamiento de seguridad, así como 180,000 pares de botas anualmente. La empresa opera principalmente bajo el esquema de pedidos específicos, y sus ventas anuales han experimentado un rápido crecimiento, pasando de \$9,008,000 millones en 2016 a más de \$17 mil millones en 2019, lo que representa un aumento aproximado del 53%. (FAME, 2022)

Conforme a las directrices de la normativa ISO, la presentación de los resultados obtenidos a través de procedimientos analíticos se alinea con los procesos de prueba. El propósito fundamental de la serie 9000 de normas ISO es evaluar la eficiencia y calidad de los procesos, lo que involucra la implementación de métodos para el seguimiento, análisis del rendimiento y medición. Cada proceso está guiado por objetivos específicos y un conjunto de indicadores que permiten evaluar su cumplimiento de manera precisa.

El estado actual de los equipos de pruebas presenta defectos de operatividad, los cuales se detallan a continuación:

### **Abrasímetro**

- La pesa vertical del brazo giratorio no está ubicada de forma correcta como especifican las directrices de la norma.
- El soporte del ensayo puede regular la profundidad, pero no el ancho.
- El contador no se encuentra funcionando.
- Se necesita de un mecanismo que mantenga la distancia fija de 2mm entre el soporte y el tambor.
- Se requiere de un mecanismo de limpieza del tambor automático.

**Flexómetro**

- La tercera mordaza de la parte superior presenta un problema mecánico, debido a tornillos defectuosos.
- Deformaciones en las mordazas.
- El contador de ciclos no está funcionando.
- No tiene interruptor de encendido y apagado.
- Existe fuga de lubricante.

**Elastómetro**

- El equipo no cuenta con medidor de presión
- El giro de la palanca se lo realiza de manera manual y debe ser automático con sus respectivos botones de operación (encendido, pausa, apagado).
- Se requiere de un sistema que detecte la “rotura de flor”.

En base al estado actual de los equipos, es imperiosa la necesidad de solucionar los inconvenientes que presentan y mejorar algunas de sus características para alcanzar los estándares internacionales y el desarrollo tecnológico al que apunta la empresa; contribuyendo de manera simultánea a que las tareas de control de calidad se realicen con mayor rapidez y precisión.

En conclusión, la repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad en la empresa FAME S.A. es necesario para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión. Esto permitirá que la empresa mejore la calidad de sus productos al no tener que depender de los resultados de las pruebas manuales, las cuales pueden estar sesgadas por errores humanos y no ofrecer los resultados deseados.

## **Planteamiento del problema**

FAME S.A., empresa del Estado Ecuatoriano (ISSFA) con 70 años de experiencia y trabajo profesional dedicada exclusivamente en la confección de vestuario, calzado y equipo de camping para las Fuerzas Armadas, es líder en seguridad y protección, produciendo 600.000 prendas y 120.000 artículos de equipamiento de seguridad y 180 000 pares de botas cubriendo la demanda y las ventas anuales han crecido rápidamente, de \$ 9.008.000 mil millones en 2016 a más de \$17 mil millones en 2019, un aumento de alrededor del 53%, su producción es principalmente bajo pedido. (FAME, 2022)

Según el enfoque que promueve la normativa ISO los ensayos son procesos cuya salida está constituida por los resultados obtenidos por el procedimiento analítico. La eficiencia y la eficacia del proceso constituyen el objetivo fundamental de la serie 9000 de las normas ISO, lo que conduce a la necesidad de establecer métodos para medir, dar seguimiento y analizar el desempeño del proceso. Esto implica que cada proceso, debe tener claramente definidos sus objetivos y contar con un conjunto de indicadores del desempeño que permitan determinar su cumplimiento.

El estado actual de los equipos de pruebas presenta defectos de operatividad, los cuales se detallan a continuación:

### **Abrasímetro**

- La pesa vertical del brazo giratorio no está ubicada de forma correcta como especifican las directrices de la norma.
- El soporte del ensayo puede regular la profundidad, pero no el ancho.
- El contador no se encuentra funcionando.
- Se necesita de un mecanismo que mantenga la distancia fija de 2 mm entre el soporte y el tambor.
- Se requiere de un mecanismo de limpieza del tambor automático.

**Flexómetro**

- Las mordazas presentan un problema mecánico, debido a tornillos defectuosos.
- Deformaciones en las mordazas.
- El contador de ciclos no está funcionando.
- No tiene interruptor de encendido y apagado.
- Existe fuga de lubricante.

**Elastómetro**

- El equipo no cuenta con medidor de presión
- El giro de la palanca se lo realiza de manera manual y debe ser automático con sus respectivos botones de operación (encendido, pausa, apagado).
- Se requiere de un sistema que detecte grietas en la "rotura de flor".

En base al estado actual de los equipos, es imperiosa la necesidad de solucionar los inconvenientes que presentan y mejorar algunas de sus características para alcanzar los estándares internacionales y el desarrollo tecnológico al que apunta la empresa; contribuyendo de manera simultánea a que las tareas de control de calidad se realicen con mayor rapidez y precisión.

La repotenciación y mejoramiento del laboratorio de control de calidad en la empresa FAME S.A. es necesario para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión. Esto permitirá que la empresa mejore la calidad de sus productos al no tener que depender de los resultados de las pruebas manuales, las cuales pueden estar sesgadas por errores humanos y no ofrecer los resultados deseados.

## **Descripción resumida del proyecto**

El presente proyecto de titulación tiene como finalidad repotenciar y mejorar el laboratorio de control de calidad mediante la automatización de los equipos de prueba de fricción, elasticidad y elección para el cumplimiento de la normativa requerida de la empresa.

Para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto se utilizará herramientas y conocimientos adquiridos en la Carrera de Ingeniería Mecatrónica como: Sistema de control Automático, Automatización, Manufactura asistida por computador, Dibujo asistido por computador.

Para el desarrollo de esta propuesta se realizará un diagnóstico preliminar del estado actual del laboratorio de control de calidad conjunto de todas las máquinas existentes en el mismo y determinar las condiciones de trabajo en las que se encuentra laborando. Posteriormente, se evaluará todos los parámetros y normas que deben cumplir las máquinas de laboratorio de control de calidad, para así poder seleccionar los materiales, componentes adecuados que cumplan con esta normativa requerida por la empresa.

El dimensionamiento de piezas, partes o elementos, tanto mecánicos como eléctricos, se realizará de forma analítica mediante cálculos verificando en programas CAD y mediante los datos que proporcionan las normas ISO (20871, 5402, 3379)

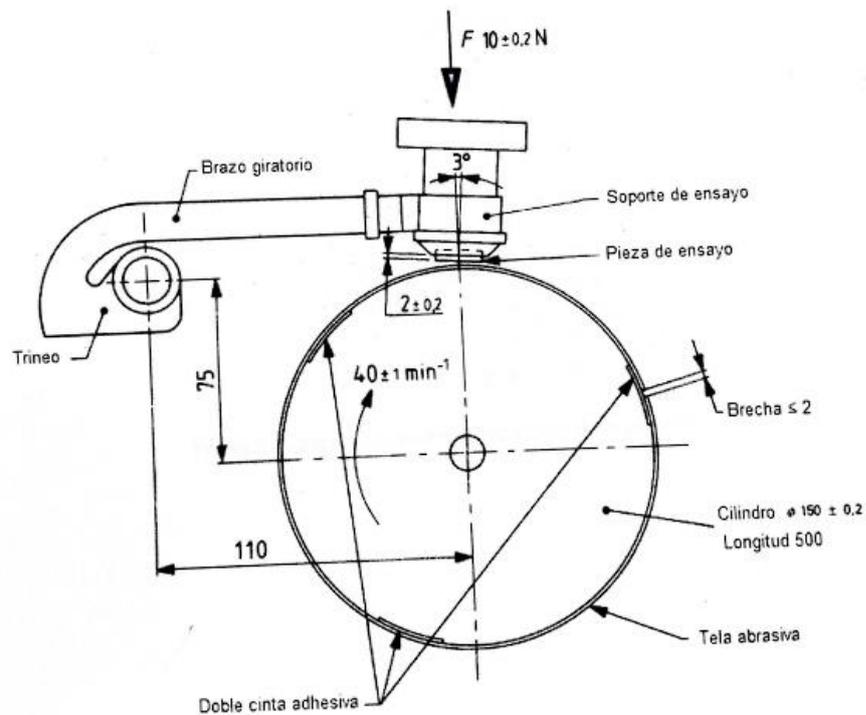
### **Abrasímetro**

Primeramente, mediante aplicación de ingeniería inversa se obtendrá las características de funcionamiento y los componentes que constituyen el equipo para obtener un modelo virtual del estado actual.

A fin de cumplir con la normativa, se realizará un rediseño del brazo giratorio y el soporte de la pieza de ensayo, el cual, debe estar presionado por una pesa contra el tambor con una fuerza vertical de  $10N \pm 0,2$ , como se puede observar en la figura 3.

**Figura 3**

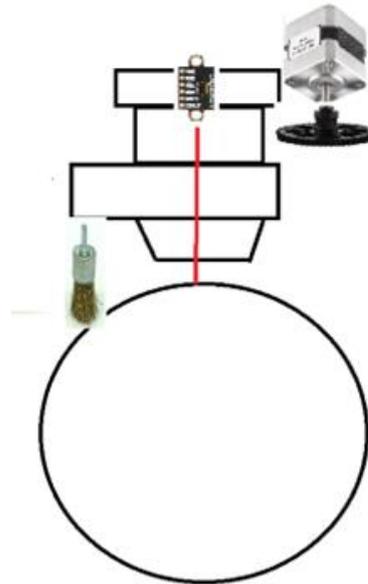
Esquema del brazo giratorio del abrasímetro



*Nota.* En la figura 3 se muestra el bosquejo del brazo giratorio del abrasímetro. Tomado de *Determination of distension and strength of Surface* por (ISO, 2016)

También, en la parte de las probetas al momento de ser extraída la suela varían su diámetro por el cual se implementará un soporte de pieza donde se podrá regular el ancho y profundidad del mismo, lo cual permitirá mantener el brazo a 2 mm del tambor abrasivo.

Para mantener la distancia de 2 mm entre el soporte de la probeta y el tambor se implementará un sistema embebido con microcontrolador para el ajuste automático mediante un sensor de distancia y un motor de pasos como se muestra en la figura 4.

**Figura 4***Esquema regulador de distancia*

*Nota.* En la figura 4 se observa el diseño y la ubicación del regulador de distancia que será implementado en el ensayo de abrasímetro.

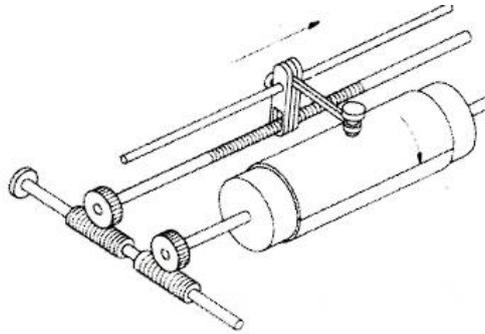
Una de las mejoras que no se describe en la normativa, pero dada la necesidad, se requiere un componente que realice la limpieza del residuo producido por la fricción y que se adhiere al tambor como se muestra en la figura 4. La limpieza debe realizarse de manera conjunta con la realización del ensayo, dicho componente será desmontable.

Las piezas mecánicas que requieren de un rediseño serán sometidas a:

- Análisis estructural, para el estudio de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad mediante el uso de herramientas CAD.
- Análisis dinámico, para comprobar que la fuerza aplicada en la probeta sea la requerida por la normativa.
- Análisis cinemático, para determinar los desplazamientos de las piezas de ajuste y del recorrido del brazo giratorio (figura 5).

## Figura 5

*Esquema de recorrido del brazo giratorio*

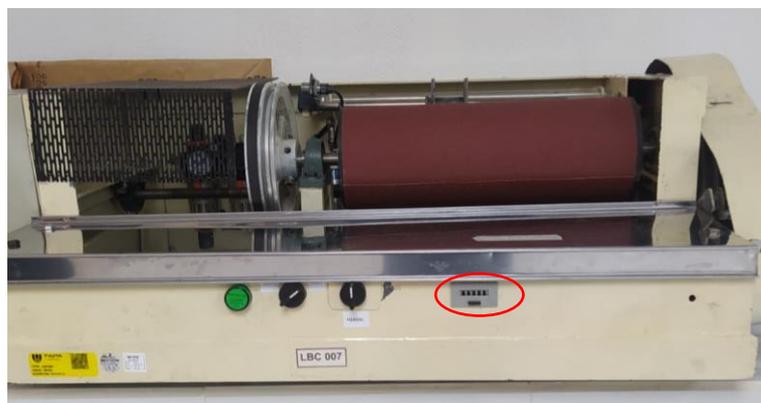


*Nota.* En la figura 5 se visualiza el esquema recorrido del brazo giratorio de la máquina abrasímetro. Tomado de *Determination of distension and strength of Surface por* (ISO, 2016)

Por último, dicha máquina dispone de un contador de ciclos, pero este no se encuentra funcionando adecuadamente, por lo tanto, según las características del controlador obtenidas en ingeniería inversa, se analizarán las opciones de implementar un contador mediante pulsos por interrupción o un contador digital basado en enconder ubicado según la figura 6.

## Figura 6

*Contador de ciclos de abrasímetro*



*Nota.* En la figura 6 se muestra una vista frontal del abrasímetro, determinando todos los mecanismos que tiene la máquina para su funcionamiento.

## Flexómetro

Para mejorar el flexómetro, se plantea una revisión mecánica de las piezas que se encuentran defectuosas (figura 7) para evaluar el grado de deterioro de las piezas.

La idea de mejora se enfoca en rediseñar las mordazas que no ajustan adecuadamente la muestra de cuero por mordazas mecanizadas en un material que soporte mayores esfuerzos y así evitar deformaciones o defectos que provoquen un mal ajuste en la probeta. Para ello, se realizará un análisis estático en el que se determine las deformaciones y esfuerzos máximos que soporta la pieza para posteriormente seleccionar el material adecuado.

### Figura 7

*Esquema de las mordazas*



*Nota.* En la figura 7 se puede evidenciar el mecanismo que requiere ser mejorado para realizar el ensayo de distensión.

Además, el flexómetro dispone de un contador automático de ciclos (figura 8), pero su funcionamiento es errático, y no sirve para tomar datos en los ensayos de control de calidad, por lo tanto, se implementará un contador mejorado en base a la disposición del controlador de la máquina de manera similar a lo planteado en el abrasímetro. Como detalle adicional, se instalará un botón de encendido y apagado dado que actualmente la máquina funciona mediante conexión y desconexión directa en el tomacorriente.

## Figura 8

### *Posición del contador de ciclos del flexómetro*



*Nota.* En la figura 8 se observa los mecanismos que necesitan ser mejorados para cumplir con la necesidad de automatizar dicha máquina.

En respuesta a las fugas de lubricante, se analizarán las opciones de correcciones o recambio; en dado caso que sea necesario se realizará un rediseño en el componente defectuoso del sistema de lubricación.

### **Elastómetro**

Este equipo requiere de un mayor nivel de automatización y modificación en la mayor parte de su estructura. Actualmente, el giro de palanca se lo realiza de manera manual (figura 9), por lo que se requiere la implementación de un motor en la palanca, teniendo en cuenta que debe contar con botones de encendido, apagado, pausa y un regulador de velocidad. Para dimensionar las características del motor se considerará lo siguiente:

- Análisis dinámico, para determinar el torque del motor.
- Análisis de potencia (mecánica y eléctrica), para dimensionar la fuente de alimentación y su controlador.

## Figura 9

*Estado actual del elastómetro*

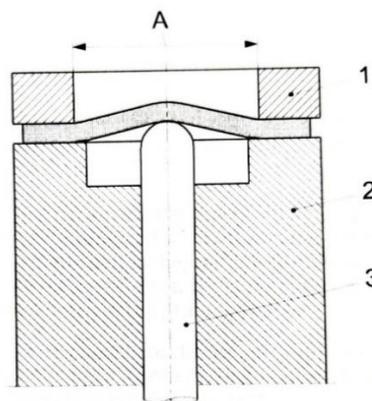


*Nota.* En la figura 9 podemos visualizar el estado de la máquina conjunto con todos sus componentes que requieren ser mejorados.

Por otra parte, la norma ISO 3379 menciona el equipo debe proporcionar datos de presión que ejerce el émbolo contra la superficie del cuero (figura 10). Por tanto, se analizará la posición óptima para colocar un sensor de presión de tal forma que no afecte el funcionamiento del mecanismo de accionamiento del émbolo.

## Figura 10

*Esquema del elastómetro*



*Nota.* En la figura 10 muestra el bosquejo de la presión que ejerce el émbolo contra la superficie de cuero. Tomado de *Determination of distension and strength of surface* por (ISO, 2016)

Adicionalmente, se implementará un sistema de detección de “rotura de flor” por visión artificial mediante una cámara instalada en la parte superior, de esta manera al producirse grietas en la muestra el controlador detendrá la marcha del motor. El algoritmo de procesamiento de imágenes para la parte de visión artificial se realizará en lenguaje de programación Python mediante el uso de librerías de código abierto como OpenCV.

Con la finalidad de hacer intuitivo el uso de la máquina se implementará un HMI donde se pueda visualizar la distensión superficial del cuero en tiempo real y los datos de presión al igual que el número de ciclos al momento de producirse la rotura de flor.

En base a los cambios que se realicen será necesario el rediseño del bastidor o al menos el acoplamiento de estructuras adicionales para el soporte de los nuevos componentes que se incorporen al equipo (motor, cámara, controlador, sensor, pantalla, botones y luces piloto).

Para la realización de pruebas se implementará un sistema de control que permita su uso en dos modos de operación (manual y automático). El modo manual permitirá al operario determinar el inicio y fin del ensayo mediante los botones de control (inicio, pausa, stop) en base a los criterios que establece la normativa. El modo automático finalizará el proceso una vez que sistema de visión artificial detecte la “rotura de flor” considerando el fin del ensayo.

Finalmente, se entregará toda la documentación necesaria sobre las mejoras implementadas, así como manuales y datos técnicos que les permitan al operario realizar el uso correcto, puesta en marcha y mantenimiento del equipo.

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Repotenciar y mejorar el laboratorio de control de calidad para automatizar las pruebas de fricción, elasticidad y distensión, mediante la aplicación de ingeniería inversa en la empresa FAME S.A. del cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha.

### **Objetivos específicos**

- Analizar los requerimientos de las máquinas industriales para extraer los datos sin afectar el funcionamiento del mismo y la normativa de diseño correspondiente.
- Diseñar los componentes mecánicos y esquemas eléctricos de cada una de las máquinas de acuerdo a su especificación requerida.
- Desarrollar los algoritmos de control para las acciones requeridas en cada máquina.
- Seleccionar los materiales mecánicos, electrónicos y eléctricos adecuados para la repotenciación del laboratorio.
- Implementar los mecanismos de automatización en los equipos del laboratorio de control de calidad.
- Ejecutar pruebas de funcionamiento de todas las máquinas para validar la hipótesis a través de pruebas experimentales y herramientas estadísticas.

### **Hipótesis**

¿La repotenciación y el mejoramiento del laboratorio de control de calidad mediante la automatización de los equipos de ensayo de fricción, elasticidad y flexión contribuirá a la empresa FAME a optimizar las pruebas de control de calidad según la normativa requerida?

### **Variables de investigación**

#### ***Variable Independiente***

Equipos automatizados del laboratorio de control de calidad.

#### ***Variable Dependiente***

Optimización de las pruebas de control de calidad.

## Capítulo II

### Fundamentación teórica

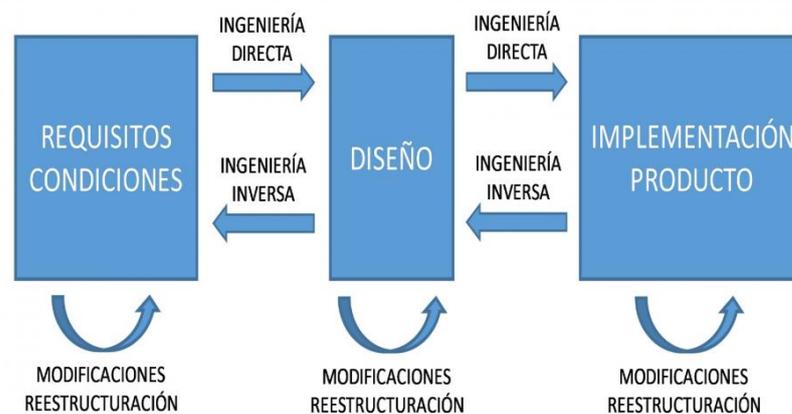
#### Ingeniería Inversa

La ingeniería inversa se enfoca en examinar productos que están disponibles en el mercado, como software, dispositivos electrónicos, piezas mecánicas, estructuras, entre otros. El propósito de este estudio es obtener información detallada sobre el diseño, construcción y funcionamiento de dichos productos. (Ramos Acosta, 2013)

Al emplear herramientas y técnicas especializadas, los ingenieros son capaces de desentrañar la estructura, el código o los componentes de un objeto, y a partir de ahí, crear una representación fiel y comprensible de su diseño primario. Esta disciplina, ampliamente utilizada en áreas como la automoción, la electrónica y la informática, fomenta la innovación y el desarrollo tecnológico. (Borja Ramírez, 1999)

#### Figura 11

*Esquema gráfico del método de ingeniería inversa*



*Nota.* En la figura 11 se muestra *el esquema conceptual del proceso de ingeniería inversa.*

Tomado de *Metalurgia* por (Interempresas, s.f.)

## Materia prima: El cuero

La piel es un órgano de protección externa del cuerpo de los animales, la misma que presenta estructuras y capas, como pelo, pluma y glándulas que se extienden por todo el cuerpo del animal. (Adzet, 2005)

### Figura 12

*Piel de cuero de vaca*



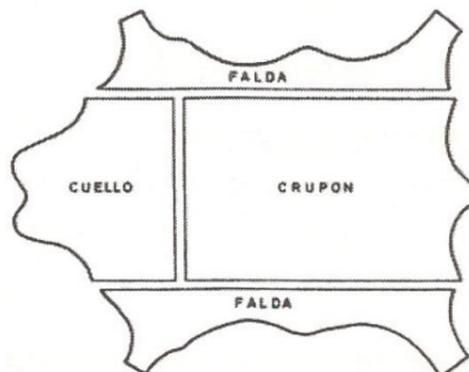
*Nota.* En la figura 12 se muestra una vista superior de la piel del cuero de la vaca. Tomado de *Artesanía y Cuero* por (Neoattack, 2018)

### **Partes de la piel bovina**

Las partes de la piel bovina fresca están constituidas por faldas, crupón y cuello, como se muestra en la figura 13.

### Figura 13

*Partes de la piel bovina*



*Nota.* En la figura 13 se muestra una distribución de las partes de la piel bovina. Tomado de *Química Técnica de Tenería* por (Adzet, 2005, págs. 27-53)

Según (Adzet, 2005) detalla la “descripción de las partes de la piel bovina:

- Crupon: Es la parte más valiosa, homogénea y compacta que poseen un peso aproximado total del 45% en su estado físico.
- Cuello: Es la parte que posee muchas arrugas y el estado fresco constituye el 25%.
- Faldas: Son los segmentos más irregulares de la piel y tiene un peso del 30% en su estado fresco.” (pág. 28)

### ***Curtido de pieles***

El curtido es el procedimiento de convertir pieles de animales en cuero, particularmente de ganado, donde el proceso de curtido consta de varias etapas: húmedo, secado y acabado. El mismo que debe estar depilado, bronceado, curtiente y tinturado para ser utilizado para la producción. (Chérrez Escobar, 2022)

### ***Clasificación de pieles***

#### ***Ruso***

Es un tipo de cuero con la superficie grabada, tiene un grosor entre 1,7 y 2 mm, está destinado especialmente a la confección de zapato militar y escolar.

#### ***Nobuck***

Se trata de un tejido hecho a partir de un tipo de piel muy similar con la gamuza por sus fibras, sin embargo, es posible diferenciar los dos materiales al analizar el lijado aplicado a la piel. (AUDACES, 2022)

En este tipo de piel se requiere un lijado exterior de la piel, a medida que al pasar la mano sobre ella se sienta suave, esto se lo hace sin tomar en cuenta lo que pase con la gamuza.

***Hidrofugada***

Es una piel que recibe un tratamiento especial, brindando resistencia a la absorción y transmisión del agua, lo que se puede identificar por su brillo característico. (Ozapato, 2020)

Una de las características más importantes es que no permite que su superficie se moje, esta acción se debe a que su acabado está hecho en base poliuretano lo que le hace especial al producto.

***Brush off***

Es un tipo de cuero de alto índice, con una superficie lisa y brillante, que se utiliza para zapatos formales, su espesor esta entre 1.5 y 2 mm. (Cadena Zurita, 2013)

**Máquinas universales de ensayos**

Según (IDM, s.f.) detallan que “son máquinas versátiles de prueba que permiten realizar una amplia variedad de ensayos, como prueba de tracción, pruebas de compresión, pruebas de flexión, pruebas de tensión, entre otros.”

***Abrasímetro***

Abrasímetro de tambor de caucho permite evaluar la resistencia al desgaste de una muestra al controlar cómo varía su volumen después del contacto con una superficie de materiales abrasivos. (ABRASIMETRO DE TAMBOR PARA CAUCHO ATS, s.f.)

**Figura 14**

*Máquina abrasímetro de tambor*



*Nota.* En la figura 14 se muestra una vista frontal de la máquina abrasímetro, así como sus componentes necesarios. Tomado de *IDM* por (ABRASIMETRO DE TAMBOR PARA CAUCHO ATS, s.f.)

***Flexómetro***

Es un probador de flexión de cuero, es un instrumento internacional utilizado para evaluar la resistencia a la flexión de varios cuerpos y sus modificaciones superficiales bajo movimientos repetidos de manera continua. (GESTER, s.f.)

**Figura 15**

*Flexion Bally GT-KC10A*



*Nota.* La figura 15 muestra un probador de flexión, así como sus mecanismos de funcionamiento. Tomado de *Equipo de prueba de resistencia* por (GESTER, s.f.)

## **Elastómetro**

Es una máquina para determinar la medida de rotura de las cremalleras, resistencia al estallido. (Muever, s.f.)

### **Figura 16**

*Elastrómetro electrónico*



*Nota.* En la figura 16 se visualiza el modelo de un elastrómetro con software para comunicación con PC. Tomado de *Elastómetro electrónico Mod.5077-E* por (Muever, s.f.)

## **Normas y Estándares**

### ***Norma ISO 9001***

La Norma ISO 9001 es uno de los estándares de gestión de la calidad más reconocidos a nivel internacional. Esta norma internacional de calidad establece los requisitos para la implementación de un sistema de gestión de la calidad (SGC) en una organización. Estos requisitos se aplican a los procesos de la organización y se centran en mejorar la satisfacción del cliente. Por lo tanto, la sirve como la base para el desarrollo de un SGC que admite a las organizaciones demostrar su compromiso con la calidad. (ISO, 2016)

### ***Norma ISO 20871***

Según (ISO, 2018) la “norma nacional establece un procedimiento para evaluar la resistencia a la abrasión de las suelas, sin importar el material del que estén fabricadas. Las siguientes normas son fundamentales para la correcta aplicación de esta norma.

EN 2222, Calzado – Atmosferas normales para el acondicionamiento y ensayo de calzado y componentes para calzado.

prEN 13400:1998, Calzado – Localización del muestreo de componentes para calzado.

ISO 2420, Cuero – Determinación de la densidad aparente.

ISO 2781, Caucho vulcanizado – Determinación de la densidad.

ISO 4649:1985, Caucho vulcanizado o termoplástico – Determinación de la resistencia a la abrasión utilizando un dispositivo de tambor cilíndrico rotatorio.” (pág. 1)

### ***Resistencia a la abrasión***

Es la capacidad de una superficie para soportar el desgaste causado por la fuerza mecánica. (ISO, 2018, pág. 1)

### ***Pérdida relativa de masa***

La pérdida de masa en miligramos de la suela después de ser sometida a la abrasión con una tela abrasiva provocará que el caucho de patrón adecuado también pierda una masa de 200 mg, en condiciones preferentes. Estas condiciones incluyen una distancia de 40 metros, una fuerza de 10 N y el uso de la pieza de ensayo en una posición no giratoria. (ISO, 2018, pág. 1)

### ***Pérdida relativa de volumen***

La disminución de volumen en milímetros cúbicos del caucho de prueba, después de ser sometido a abrasión mediante una tela abrasiva, dará lugar a que el caucho patrón adecuado también sufra una reducción de masa de 200 mg en condiciones de referencia. Estas condiciones incluyen una distancia de 40 metros, una fuerza de 10 N y el uso de una pieza de ensayo que no gira. (ISO, 2018, pág. 1)

### ***Máquina de abrasión***

Según (ISO, 2018, pág. 2) “Describen que el dispositivo de evaluación se compone de un soporte que permite el desplazamiento lateral de la muestra de prueba, junto con un cilindro rotativo al cual se adhiere el material abrasivo”.

### ***Muestreo y acondicionamiento***

Según (ISO, 2018) detalla que las “muestras deben tener forma cilíndrica con un diámetro de 16 mm con una tolerancia de  $\pm 0,2$  mm, y una altura mínima de 6 mm. Si no es posible obtener muestras con el espesor adecuado, se permite alcanzar el grosor requerido mediante la unión de las muestras con un componente de base que tenga una dureza no inferior a 80 IRHD. En tal caso, el espesor resultante de esta combinación no debe ser menor a 2 mm.

Se requiere un mínimo de tres muestras para el ensayo, las cuales deben ser seleccionadas siguiendo las pautas establecidas en prEN 13400:1998. Todas las muestras deben ser preparadas de acuerdo con EN 12222 antes de llevar a cabo el ensayo, o bien ser acondicionadas durante al menos 24 horas antes del mismo.” (pág. 3)

### ***Procedimiento de ensayo***

Según (ISO, 2018) detalla que este “procedimiento se hace referencia el ensayo de resistencia a la abrasión a realizar, para el cual debe seguir los siguientes pasos:

- Primero, previo a cada ensayo, se debe eliminar cualquier residuo de caucho proveniente de pruebas anteriores de la tela abrasiva mediante el uso de un cepillo.
- Después, pesar la pieza de ensayo con una aproximación de 1 mg en términos de precisión. Asegurar la sujeción de la pieza de ensayo en el soporte lateralmente móvil de manera que una porción de  $2,0 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$  se extienda desde el cilindro hueco.
- Luego, se debe aplicar una fuerza vertical de  $10 \text{ N} \pm 0,2 \text{ N}$  para presionar la probeta contra el tambor.

- A continuación, proceda a desplazar el soporte de la pieza de ensayo y el trineo (carro) a su posición inicial, coloque la pieza de ensayo sobre la tela abrasiva y ponga en movimiento el cilindro.
- Finalmente, es importante que la muestra no se desgaste por completo hasta el final del ensayo, es decir, la tela abrasiva no debe estar en contacto con ninguna parte del soporte. En caso de que esto ocurra, repita el ensayo utilizando una distancia más corta.” (pág. 3)

### ***Norma ISO 5402***

Según (ISO, 2011) detalla que la “norma ISO 5402 establece un protocolo de evaluación para medir la elasticidad de la piel en condiciones secas o húmedas, incluido el efecto de los acabados superficiales. Este procedimiento es aplicable a todos los tipos de piel de menos de 3,0 mm de espesor. Las siguientes reglas son necesarias para la correcta implementación de esta norma.

ISO 2418 Cuero. Ensayos químicos, físicos, mecánicos y de solidez: Localización de la zona de toma de muestras.

ISO 2419 Cuero. Ensayos físicos y mecánicos: Preparación y acondicionamiento de muestras.

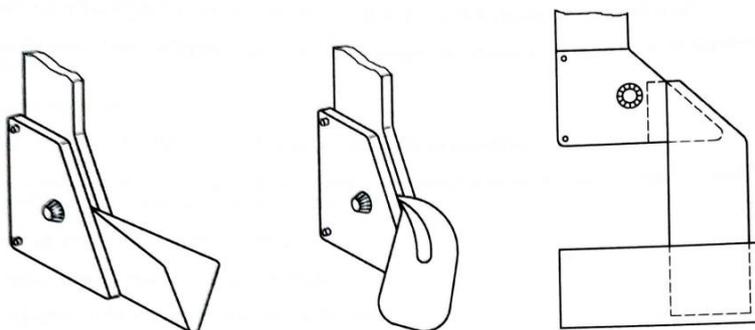
ISO 3696:1987 Agua para uso en análisis de laboratorio: Especificaciones y métodos de ensayo.” (pág. 6)

### ***Principio del método***

Según (ISO, 2011) detalla que “una probeta se somete a flexión y se asegura en una mordaza superior móvil, con la superficie de interés hacia el interior, y en una mordaza inferior inmóvil, con la superficie de interés hacia el exterior. El movimiento de la mordaza superior provoca la formación de un pliegue a lo largo de la probeta. Se lleva a cabo una inspección regular de la probeta para identificar posibles daños.”

## Figura 17

### Procedimiento de colocación de muestras



*Nota.* En la figura 17 se muestra la probeta colocada en la mordaza superior, luego doblada hacia abajo y finalmente sujeta firmemente en ambas mordazas. Tomado de *Determination of flex resistance* por (ISO, 2011)

### Muestreo y preparación de las muestras

Según (ISO, 2011) detalla que el “muestreo se lleva a cabo siguiendo las pautas establecidas en la norma ISO 2418 detalladas a continuación.

- Se recolectan al menos cuatro muestras para el ensayo en condiciones secas y/o cuatro muestras para el ensayo en condiciones húmedas, aplicando el troquel en el lado de la flor de las muestras. Se cortan al menos dos muestras con el lado largo alineado de manera paralela al espinazo y otras dos con el lado largo dispuesto de manera perpendicular al espinazo.
- Para llevar a cabo el ensayo de flexión en condiciones secas, se sigue el procedimiento indicado en la norma ISO 2419, y las probetas son sometidas al ensayo en un ambiente acondicionado.
- En el ensayo de flexión en condiciones húmedas, las probetas se colocan dentro de un crisol de vidrio y se agrega la cantidad adecuada de agua destilada o desionizada hasta que el nivel de agua alcance al menos 10 mm.

Luego, el crisol se introduce en un desecador y la presión se reduce por debajo de 4 Kpa durante 2 minutos.

Se restablece la presión atmosférica normal y se repite este proceso de reducción y restablecimiento de la presión dos veces. Posteriormente, se retira la probeta y se elimina el exceso de agua utilizando papel secante. Inmediatamente después, se procede a realizar el ensayo de flexión en condiciones húmedas”.

### ***Procedimiento del método a ensayar***

Según (ISO, 2011) detalla que este “procedimiento se hace referencia el ensayo de flexión a realizar, para el cual debe seguir los siguientes pasos:

- Inicialmente, tanto la mordaza superior como la inferior están abiertas para que la distancia entre ellas sea al menos el doble del espesor de la pieza de prueba. A continuación, se ajusta el motor de modo que el voladizo de la mordaza quede paralelo al borde superior de la mordaza inferior estática.
- Luego, la muestra se dobla por la mitad con la superficie de prueba hacia adentro para unir los dos lados largos. La muestra doblada se coloca en la abrazadera de modo que el borde doblado descansa sobre el cubo y la cabeza descansa sobre el tope creado por el tornillo de la abrazadera.
- Luego, los extremos libres de la muestra se extraen y se bajan alrededor de la abrazadera. Las superficies internas se juntan y el extremo libre se sujeta sobre la mandíbula inferior, manteniendo la piel tensa sin una presión excesiva.
- El flexómetro se utiliza para realizar un determinado número de ciclos de plegado de acuerdo con las siguientes especificaciones:
  - Elasticidad en seco: 500; 1000; 5000; 10.000; 20.000; 50.000; 100.000; 150.000; 200.000; 250.000 ciclos.
  - Elasticidad húmeda: 500; 1000; 2500; 10.000; 20.000; 25.000; 50.000 ciclos.

- Las muestras de prueba húmedas se retiraron cada 25.000 ciclos para verificar la efervescencia, luego se volvieron a humedecer y se colocaron en el flexómetro. Las muestras se doblan sin dobleces laterales excesivos; si no se doblan de esta manera, registre esta observación.
- Luego se detiene la cinta métrica y se estira la muestra. Se dobla a lo largo de su eje longitudinal y se evalúa visualmente con buena iluminación usando visión normal y una lupa. Se registra cualquier daño en el área doblada.
- Se comprueban por última vez los daños causados por el corte de muestras con graves consecuencias. Este daño puede manifestarse de varias maneras, como decoloración del acabado, agrietamiento o agrietamiento, pérdida de adherencia del acabado, formación de polvo o descamación del acabado.
- Finalmente, si solo se encuentran daños menores durante la inspección, la prueba se repite con un nuevo grupo de al menos cuatro piezas de prueba. Si todas las muestras adicionales pasan la prueba sin error, el resultado se registra como “sin error”; de lo contrario, el peor daño se encontró en cualquiera de las muestras adicionales reportadas.” (págs. 8-9)

### **Norma ISO 3379**

Según (ISO, 2015) detalla que la “norma ISO 3379 describe el procedimiento para evaluar el ensanchamiento y la resistencia de la superficie acabada de la flor de cuero. Este método es aplicable a todas las pieles flexibles y resulta particularmente adecuado para evaluar la idoneidad del cuero en el montaje de la parte superior de calzado. Las siguientes normas son fundamentales para la correcta aplicación de esta norma.

Las normas ISO 2418, ISO 2419 y ISO 2589 se refieren a pruebas relacionadas con el cuero, abordando aspectos químicos, físicos, mecánicos y de solidez.

La norma ISO 2418 se centra en la localización de la zona de toma de muestras. La ISO 2419 se enfoca en ensayos físicos y mecánicos, abordando la preparación y acondicionamiento de las muestras.

La norma ISO 2589 trata sobre ensayos físicos y mecánicos específicos, particularmente la determinación del espesor del cuero.” (pág. 1)

### ***Muestreo y preparación de muestras***

Según (ISO, 2015) detalla que “prepare la muestra de cuero siguiendo las pautas establecidas en la norma ISO 2419.

- En primer lugar, proceda a obtener la muestra siguiendo las directrices de la norma ISO 2418.
- Luego, utilizando el cuchillo de presión, realice la incisión de al menos tres piezas de prueba de acuerdo con lo indicado en la norma ISO 2419.

Si se demanda la evaluación de más de dos cueros o pieles dentro de un lote, solo se llevará a cabo una única prueba. Será necesario tomar una pieza de prueba de cada cuero o piel en cuestión, asegurándose de que el número total no sea inferior a tres piezas en total.

- Finalmente. realice la medición del grosor de las muestras de conformidad con la norma ISO 2589.” (pág. 3)

### ***Procedimiento para realizar el ensayo***

Según (ISO, 2015) detalla “los pasos a seguir son:

- "Primero, asegurar que la máquina de ensayo esté ajustada con el pistón completamente retraído hacia cero o en la posición de menor extensión. En caso de contar con medidor de fuerza máxima, restablecer el valor a cero.
- Luego, fije la pieza de prueba acondicionada en la máquina de ensayo de modo que el embolo de bola haga contacto con el reverso de la pieza de ensayo y esta se encuentre en una posición plana.

- Incrementación de la distensión a razón de  $0,20 \text{ mm/s} \pm 0,05 \text{ mm/s}$  y vigilar el grano o el acabado superficial por la aparición de una fisura o primera variación de daño en la superficie.
- Se observa la aparición de una grieta o un primer daño, registre la distensión en milímetros con una exactitud de  $0,1 \text{ mm}$  y la fuerza en Newtons con el valor más cercano a  $10 \text{ N}$ .
- En algunos casos de cueros, es posible determinar el agrietamiento de la flor o el acabado superficial de desgaste analizando la curva fuerza – desplazamiento y con ello reconfirmar la evaluación visual.
- Por consiguiente, si la pieza de prueba no revienta cuando se alcanza la fuerza máxima, registre el desplazamiento e informe el resultado como “distensión máxima superior”.
- Por último, retire la muestra de prueba y examine las marcas dejadas por la abrazadera en la superficie de desgaste, si se detecta signos de deslizamiento causadas durante el ensayo, ya sea por anillos de sujeción o desgarro de los bordes sujetos, descarte los resultados y repita el procedimiento.” (págs. 3-4)

## Python

Según (Rossum, 2000), Python se caracteriza por ser un lenguaje de programación accesible y potente. Proporciona estructuras de datos de alto nivel eficientes y una solución simple pero efectiva para la programación orientada a objetos. Su sintaxis refinada, gestión dinámica de tipos y naturaleza interpretativa lo convierten en una opción ideal tanto para el desarrollo ágil de aplicaciones multiplataforma y de dominio como para la creación de secuencias de comandos.

Python tiene una sintaxis clara y concisa que facilita su aprendizaje y uso. Es un lenguaje multiparadigma capaz de soportar programación imperativa, orientada a objetos y funcional. Además, es altamente portátil y compatible con una amplia gama de sistemas operativos, incluidos Windows, macOS y Linux. (Arturo, 2013)

La principal fortaleza de Python radica en la amplia gama de módulos y funciones que proporciona para realizar una amplia variedad de tareas, desde la manipulación de datos y el acceso a bases de datos hasta el desarrollo web, análisis de datos e inteligencia artificial, entre otras cosas. Estas características hacen de Python una herramienta extremadamente versátil y poderosa. (Arturo, 2013)

### **Visión artificial**

La visión artificial constituye un campo de estudio dentro del ámbito de la ingeniería que se centra en la creación y desarrollo de sistemas capaces de percibir, interpretar y comprender imágenes o videos de manera análoga a la visión humana. A través de algoritmos y técnicas avanzadas, la visión artificial permite extraer información sustancial de imágenes y utilizar este conocimiento para la toma de decisiones y la ejecución de tareas específicas. Sus aplicaciones abarcan diversas áreas, como la medicina, la robótica, la seguridad y la automatización industrial.

La visión artificial ha revolucionado nuestra relación con las máquinas, al posibilitar la creación de sistemas inteligentes con capacidad para detectar objetos, reconocer rostros, rastrear movimientos y mucho más. A medida que la visión artificial continúa evolucionando, su influencia se extiende al desarrollo de tecnologías aún más avanzadas y sofisticadas, dando forma a un futuro en constante crecimiento y transformación. (Calle, 2005)

### **Tratamiento de imágenes**

El procesamiento de imágenes en visión artificial implica a la utilización de métodos y algoritmos con el propósito de adquirir datos y llevar a cabo tareas relacionadas a la interpretación de imágenes. Esta área es fundamental en visión artificial y es aplicado en diferentes áreas, como identificación de objetos, rastreo de elementos, reconocimiento facial, entre otras. (Mínguez, 2021)

Según (Juan Humberto Sossa Azuela, 2011) detalla que el procesamiento de imágenes en visión artificial requiere cumplir de una serie de etapas para realizar su análisis, así como se describe a continuación:

- Preprocesamiento: En esta primera etapa, se realizan procesos como eliminación de ruido, aumento de calidad de imagen, retoque de la luz de imagen, regulación de contraste y corrección de brillo o suavización de bordes.
- Segmentación: La segunda etapa se enfoca en separar las regiones o segmentos de las imágenes y facilitar su análisis individual, este método se logra con métodos como umbralado, segmentación basada en bordes y crecimiento de regiones, etc.
- Eliminación de características: En etapa consiste en reconocer y retirar características como texturas, colores, puntos clave, etc., de objetos presentes en la imagen.
- Clasificación o identificación: En la cuarta etapa se utilizan algoritmos de aprendizaje automático entrenamiento de redes neuronales, SVM o arboles de decisión, para ordenar o identificar objetos de interés en la imagen, todo este proceso inicia una vez que se eliminó las características.
- Postprocesamiento: Finalmente en la última etapa se elimina el exceso ruido, se fusionan segmentos y se filtran los resultados, todo este método se realiza aplicando técnicas de refinamiento de resultados obtenidos y reducción de mejoras de presión.

(pág. 25)

### **Interfaz Humano- Máquina (HMI)**

Es un vínculo entre el operario y la planta que permite controlar entornos, procesos industriales a través de una Interfaz Humano-Máquina. (Autycom, 2023)

El HMI juega un papel importante para el operario y supervisor de línea, ya que permiten manipular e inspeccionar procesos industriales de fabricación. Donde mediante un panel de instrumentos permite la toma de decisiones y el control de la planta en producción. (Autycom, 2023)

## Figura 18

### Interacción HMI



*Nota.* En la figura 18 se visualiza al operario interactuando con el interfaz humano máquina.

Tomado de *Innovación Inteligente* por (Autycom, 2023)

El objetivo del HMI es presentar datos en tiempo real, así como graficas visuales que brinden información significativa y contextual sobre el estado de actuadores, sensores y parámetros dentro del proceso específico.

## Sensores y actuadores

### Sensores

Comprender la naturaleza de un sensor es crucial, y para ello es esencial tener claro qué es un transductor. En términos sencillos, un transductor es un dispositivo capaz de transformar una variable física en otra de naturaleza completamente distinta. En consecuencia, se deduce que un transductor puede desempeñar la emplear tanto de sensor como actuador, pero no todo transductor es un sensor. (Corona Ramírez y otros, 2016)

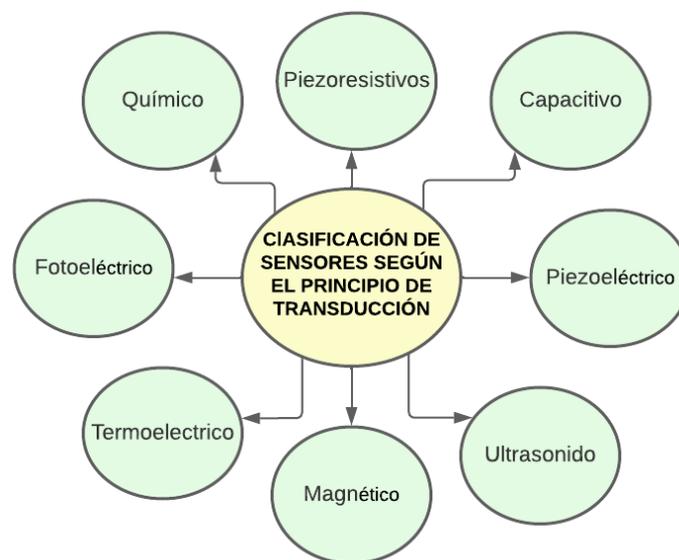
Sin embargo, un transductor se puede describir a un sensor como una señal de entrada que proporciona una salida y se puede manipular a partir de una variable física o medida.

### **Clasificación de sensores**

Continuando con lo descrito anteriormente, los sensores se pueden clasificar en función del tipo de transductor para ser utilizados de acuerdo a la necesidad de diseño. Sin embargo, este enfoque de clasificación tiende a ser poco práctico, ya que no proporciona una visión clara de qué tipo de variable física pueden medir, como se ilustra en la figura 15.

### **Figura 19**

*Clasificación de los sensores de acuerdo al principio de transducción*

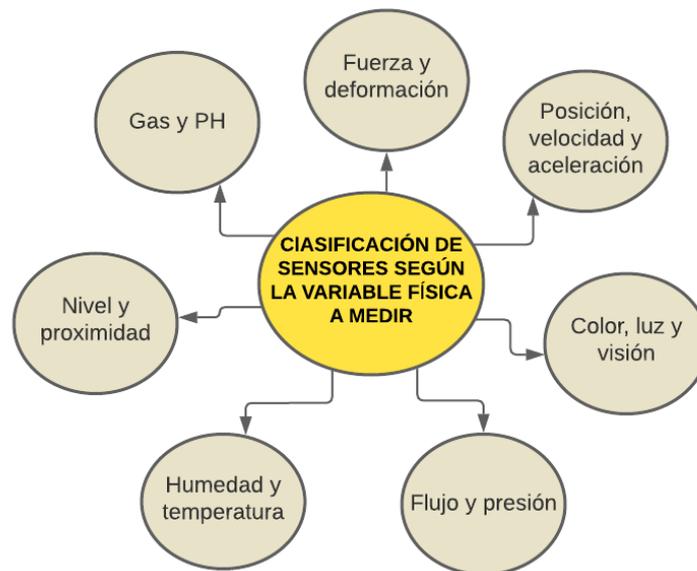


*Nota.* En la figura 19 se muestra la distribución de los sensores de acuerdo al principio de transducción. Tomado de *Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino* por (Corona Ramírez y otros, 2014)

Complementando a esto, los sensores también se clasifican de acuerdo al tipo de variable que están midiendo. Esta clasificación es el más común y facilita la aplicación que se le da uso de acuerdo a la función del tipo de variable que se busca medir. Esta distribución está representada en la figura 20.

## Figura 20

*Distribución de sensores según la variable física a medir*



*Nota.* La figura 20 se muestra una variedad de variables físicas que pueden ser medidas mediante sensores. Tomado de Tomado de *Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino* por (Corona Ramírez y otros, 2016)

### **Sensores de Fuerza**

Los sensores de fuerza, también denominados células de carga, son elementos que producen una señal eléctrica proporcional a la fuerza que actúa sobre ellos. (Mapro, 2023)

### **Celdas de carga**

La celda de carga es un transductor que cambia una fuerza en una señal eléctrica. Este proceso de conversión se da cuando es aplicado una fuerza mecánica a la célula de carga, provocando una deformación (galgas), con ello se obtiene el valor de la fuerza ejercida a través de una señal eléctrica. (5Hertz Electrónica, 2023)

## Figura 21

### Celda de carga



*Nota.* En la figura 21 se puede apreciar el modelo físico de una celda de carga. Tomado de *Electrónica y tecnología desde 2014* por (Maetrónica, 2014)

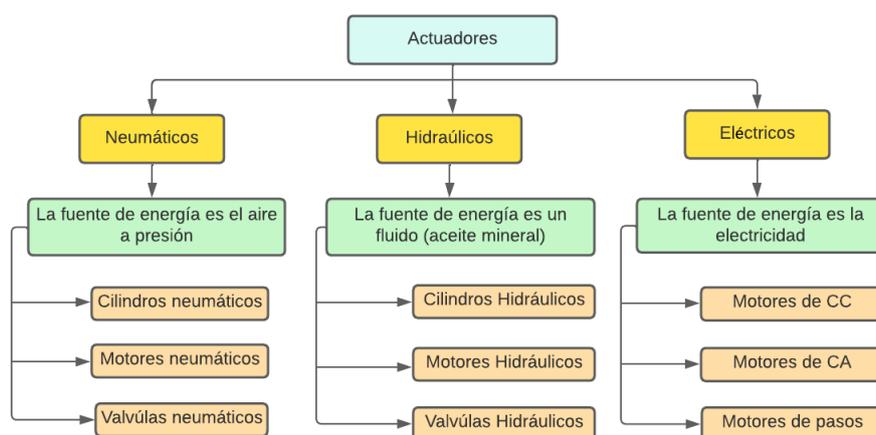
## Actuadores

Los actuadores son dispositivos que tienen la habilidad de generar una fuerza y mediante la conversión de energía produce un cambio de velocidad, posición de un elemento mecánico. (Corona Ramírez y otros, 2014)

Los actuadores se dividen en dos grupos: por el movimiento generado y por la energía utilizada, se representa en la figura 22.

## Figura 22

### Clasificación de los actuadores



*Nota.* La figura 22 muestra tres categorías de actuadores, distribuidos por el tipo de energía generada con sus respectivos ejemplos. Tomado de *Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino* por (Corona Ramírez y otros, 2016)

En consecuencia, también se clasifican en actuadores lineales y rotativos de acuerdo al tipo de movimiento generado.

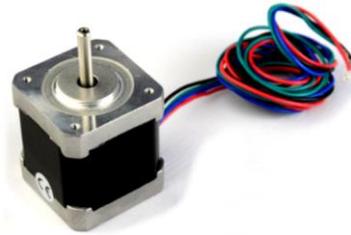
- **Actuadores lineales:** Son dispositivos que transforman el movimiento giratorio del motor en un desplazamiento de línea recta. (Lara, 2017) Su funcionamiento se da cuando la cremallera o husillo del motor adquiere un movimiento lineal provocado por un movimiento rotatorio.
- **Actuadores Rotativos:** Los actuadores rotativos son dispositivos mecánicos que convierten la energía eléctrica, hidráulica o neumática en un movimiento giratorio. (Cowan dynamics, 2020)
- **Actuadores eléctricos:** Los actuadores eléctricos son componentes que integran un motor eléctrico junto con un mecanismo reductor, permitiendo accionar dispositivos para realizar movimientos o acciones particulares de manera específica. (Rubio, 2019)
- **Actuadores de corriente directa:** Dispositivos que fluyen en una sola dirección operados por una corriente eléctrica. (Corona Ramírez y otros, 2014) Estos motores son los más utilizados en la actualidad por el nivel de control y versatilidad que ofrecen.

### ***Motor a pasos***

Un motor a pasos es un tipo de motor de corriente continua DC sin escobillas que puede estar formado por imanes permanentes o presentar una reluctancia variable. (MecatrónicaLATAM, 2021) En otras palabras, el motor paso a paso puede lograr una posición precisa sin necesidad de utilizar sensores de retroalimentación, lo que permite representarlo como un controlador de circuito abierto.

**Figura 23**

*Motor a pasos Nema 17*



*Nota.* En la figura 23 se puede apreciar la composición externa de un motor a pasos.

Tomando de *Motor Nema 17* por (TECmikro, 2015)

Las características del motor a pasos son los siguientes:

- Poseen la habilidad de girar en ambas direcciones y con incrementos angulares precisos.
- Conservan un torque de retención incluso cuando están detenidos (a velocidad cero).
- Son controlados utilizando circuitos digitales.

***Microprocesadores y Microcontroladores******Microcontroladores***

Un microcontrolador es un sistema integrado que se encarga de controlar el funcionamiento de un dispositivo específico, actuando como una computadora dedicada. Su memoria almacena un único programa que controla dicho dispositivo. Estos microcontroladores suelen ser circuitos integrados de tamaño reducido, que pueden ser montados directamente en el mismo dispositivo que están controlando, lo que se conoce como microcontrolador incrustado. (Brito, 2023)

***Microprocesadores***

Un microprocesador es un dispositivo de circuito integrado que puede ser programado y tiene habilidades para tomar decisiones y realizar operaciones de cálculo de

manera similar a la unidad central de procesamiento CPU de una computadora.

(Vijayaraghavan, 2020)

Actualmente, los microprocesadores se encuentran presentes en casi todos los dispositivos electrónicos, y además son utilizados en aplicaciones avanzadas como radares, gracias a los notables avances en tecnología e industria electrónica.

### ***Raspberry Pi 4***

Raspberry Pi es un computador de tamaño reducido y económico que se puede conectar a un monitor de computadora o televisor. (Foundation, 2014)

Raspberry Pi brinda a personas de todas las edades la oportunidad de explorar el mundo de la automatización y educarse a programar lenguajes de Python y Scratch. Además, su habilidad para interactuar con el entorno externo lo hace una herramienta esencial para una diversidad de proyectos creativos, incluyendo máquinas de música y sensores de movimiento, entre otros.

Según (RaspberryPi.org, 2019) define que la Raspberry Pi 4 “es la más popular y la última incorporación en la base de ordenadores.” Las características técnicas de este microprocesador están detalladas en la Tabla 1.

### **Figura 24**

*Raspberry Pi 4*



*Nota.* En la figura 24 se puede visualizar una vista frontal de la Raspberry Pi 4. Tomado de *Raspberry Pi 4 Computer Model B* por (RaspberryPi.org, 2019, pág. 2)

## Figura 25

### Especificaciones técnica Raspberry Pi 4

## Specification

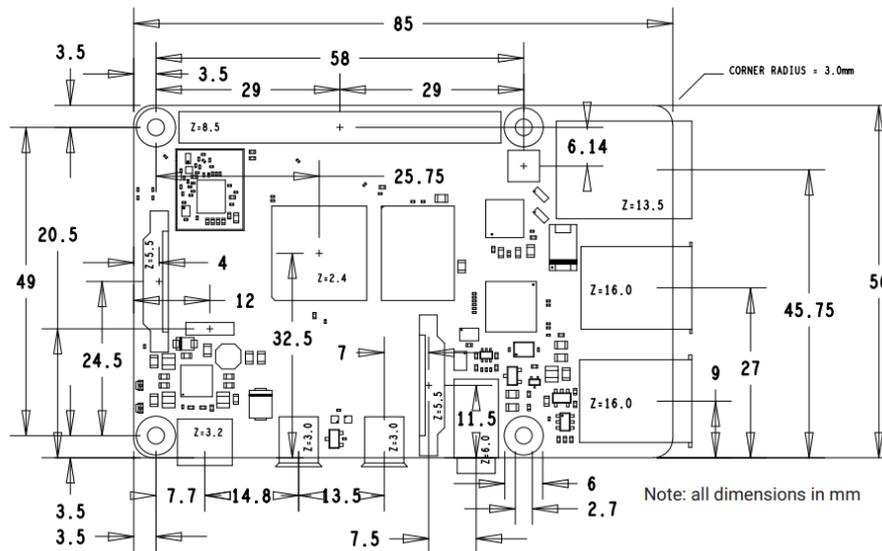
<b>Processor:</b>	Broadcom BCM2711, quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
<b>Memory:</b>	1GB, 2GB or 4GB LPDDR4 (depending on model)
<b>Connectivity:</b>	2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethernet 2 × USB 3.0 ports 2 × USB 2.0 ports.
<b>GPIO:</b>	Standard 40-pin GPIO header (fully backwards-compatible with previous boards)
<b>Video &amp; sound:</b>	2 × micro HDMI ports (up to 4Kp60 supported) 2-lane MIPI DSI display port 2-lane MIPI CSI camera port 4-pole stereo audio and composite video port
<b>Multimedia:</b>	H.265 (4Kp60 decode); H.264 (1080p60 decode, 1080p30 encode); OpenGL ES, 3.0 graphics
<b>SD card support:</b>	Micro SD card slot for loading operating system and data storage
<b>Input power:</b>	5V DC via USB-C connector (minimum 3A <sup>1</sup> ) 5V DC via GPIO header (minimum 3A <sup>1</sup> ) Power over Ethernet (PoE)-enabled (requires separate PoE HAT)
<b>Environment:</b>	Operating temperature 0–50°C

*Nota.* La figura 25 se exhibe las características técnicas más relevantes que se deben considerar al seleccionar un modelo de Raspberry Pi. Tomado de *Raspberry Pi 4 Computer Model B* por (RaspberryPi.org, 2019, pág. 3)

## Especificaciones físicas

**Figura 26**

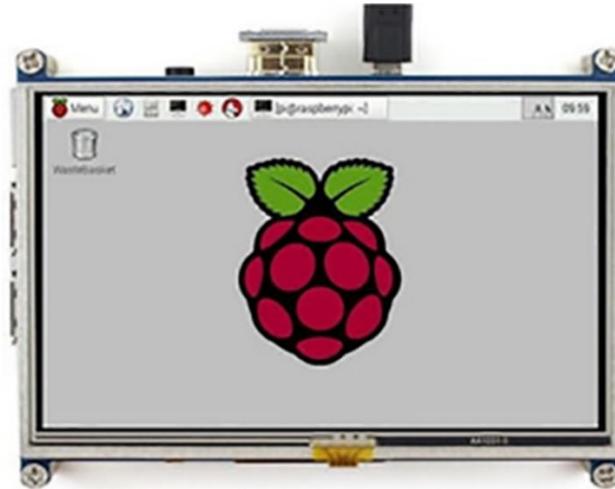
*Medidas de una RaspberryPi 4 Model B*



*Nota.* La figura 26 muestra las dimensiones de cada uno de los elementos que se encuentran en una Raspberry Pi 4. Tomado de *Raspberry Pi 4 Computer Model B* por (RaspberryPi.org, 2019, pág. 4)

### ***Pantalla touch 5 pulgadas para Raspberry Pi***

Es una pantalla táctil TFT de 5 pulgadas es un mini monitor HDMI pequeño y sencillo que puede ser utilizado con cualquier dispositivo que tenga salida HDMI, aunque no tenga un panel táctil incorporado. Esto permite conectarla directamente a la Raspberry Pi para su uso. (Rambal Automatización y Robótica, s.f.) Las especificaciones técnicas de esta pantalla están detalladas en la Tabla 2.

**Figura 27***Pantalla para Raspberry Pi*

*Nota.* La Figura 27 presenta una vista superior de la pantalla para Raspberry. Tomado de *Robótica Electrónica y Computación Ingeniería* por (Megatronica.cc, 2022)

**Tabla 1***Pantalla touch 5 pulgadas para Raspberry Pi*

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
<b>Resolución</b>	800 x 400
<b>Pantalla</b>	Tactil TFT de 5 pulgadas
<b>Tipo de pantalla</b>	Resistiva
<b>Entradas sonido y video</b>	HDMI
<b>Frecuencia</b>	60 Hz
<b>Controlador</b>	Lcd IC ILI9486L
<b>Alimentación</b>	Conector USB 5V a 1A
<b>Tamaño</b>	Lcd 143mm x 83 mm

*Nota.* En la tabla 1 se presentan las especificaciones técnicas más importantes de la pantalla touch 5 pulgadas. Tomado de *Robótica Electrónica y Computación Ingeniería* por (Megatronica.cc, 2022)

### **Microscopio Digital Usb**

Es un tipo de cara de la forma más básica de microscopio digital, diseñado para mostrar objetos ampliados en una pantalla de computadora. (PCE INSTRUMENTS, s.f.) Las características técnicas están detalladas en la Tabla 3.

#### **Figura 28**

*Microscopio digital Usb*



*Nota.* La figura 28 muestra una vista desde frontal de la cámara del Microscopio digital USB, así como su soporte y conector. Tomado de *Impomel Importadora* por (IMPORMEL , s.f.)

#### **Tabla 2**

*Microscopio digital USB portátil*

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
<b>Tipo de Sensor</b>	Semicondutor de óxido metálico
<b>Enfoque de rango</b>	10 mm
<b>Resolución Estándar</b>	- 640 x 480
<b>(Video e imagen)</b>	- Valor máximo: 1600 x 1200
<b>Luz de fuente</b>	Leds integrados (8)
<b>Frecuencia de retrato</b>	Iluminación de 30 fps a 600 lux
<b>Zoom</b>	x200 - x1600
<b>Alimentación</b>	Puerto Usb, 5V DC

Parámetro	Especificación
Controlador	Lcd IC ILI9486L
Dimensiones	110 x 33 mm
Peso	90 g

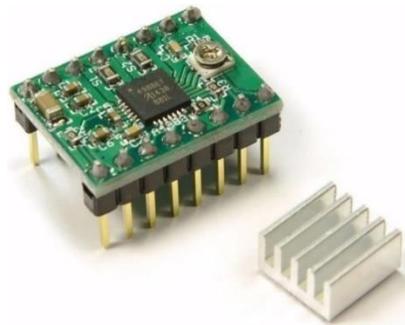
*Nota.* En la tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas más importantes del microscopio USB. Tomado de *Microscopio USB PCE-MM 800* por (PCE INSTRUMENTS, s.f.)

### **Driver A4988**

Es un controlador driver que simplifica el control de motores paso a paso desde dispositivos como autómatas o procesadores, como Arduino. (Luis Llamas , s.f.) Las características técnicas del driver A4988 están detalladas en la Tabla 3.

### **Figura 29**

*Driver A4988*



*Nota.* La figura 29 presenta una vista frontal del controlador A4988 junto con su encapsulamiento de enfriamiento. Tomado de *Electrónica Práctica Aplicada* por (EPA, s.f.)

### **Tabla 3**

*Driver A4988*

Parámetro	Especificación
Potencia de alimentación (VMOT)	8V-35V DC (recomendado 12V/24VDC)
Voltaje de control-alimentación (VDD)	3V-5V DC

<b>Parámetro</b>	<b>Especificación</b>
<b>Voltaje lógico de control</b>	3.3V-5V DC
<b>Corriente de salida</b>	1A por bobina (con ventilación máx. 2A)
<b>Salidas</b>	Low RDS (ON)

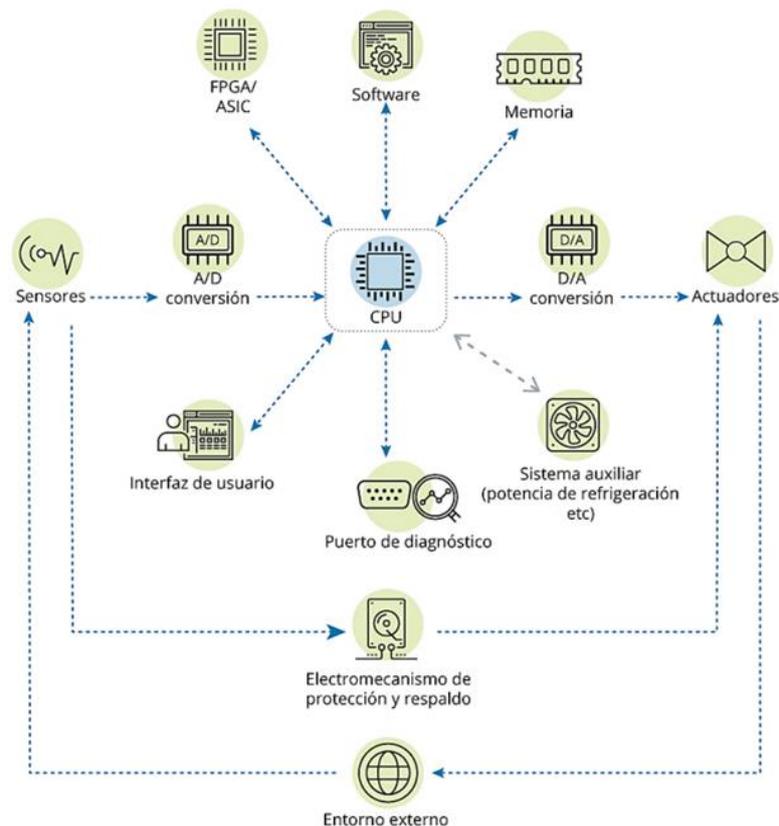
*Nota.* En la tabla 3 se presentan las especificaciones técnicas más importantes del driver A4988. Tomado de *DRIVER PAP POLOLU A4988 1A* por (NAYLAMP MECHATRONICS, s.f.)

### **Sistema embebido**

Según (Alva Alarcón & Acorta Santisteban, 2020, pág. 21) define que: “Un sistema embebido es un conjunto de elementos electrónicos interrelacionados que cumplen funciones específicas. En resumen, lo que distingue a un sistema embebido de otros tipos de sistemas es su característica principal de contar con un procesador central”.

## Figura 30

### Dispositivos de los sistemas embebidos



*Nota.* En la figura 30 se muestra los componentes que conforman un sistema embebido.

Tomado de *Sistemas embebidos Guía Metodológica para su desarrollo* por (Alva Alarcón & Acorta Santisteban, 2020, pág. 21)

Según (Alva Alarcón & Acorta Santisteban, 2020) define las siguientes características de los sistemas embebidos:

- Los sistemas embebidos cuentan con una unidad de procesamiento central. Las mismas que están compuestas por microprocesadores, microcontroladores o una mezcla de ellos.
- El mantenimiento es mínimo y en caso habitual nulo.
- Estos sistemas son altamente confiables y seguros.
- Estos sistemas cuentan con una interfaz de usuario simple o, en algunos casos, carecen de ella.

## Capítulo III

### Diseño y construcción

En el presente capítulo se desarrollará el diseño de los sistemas a implementar con el fin de repotenciar el laboratorio en base a los requerimientos de las normativas ISO y a las necesidades de los operarios de las máquinas en las que se llevan a cabo los ensayos de control de calidad.

#### **Diseño de los sistemas**

El desarrollo de un producto o proyecto generalmente parte de una necesidad identificada sin que afecte directamente el método de diseño que se aplique. Para una adecuada identificación de necesidades se ha realizado una adaptación de “El proceso genérico de desarrollo de productos” de Karl Ulrich y Steven Eppinger, el cual resalta la importancia de recopilar información proveniente del cliente.

#### ***Necesidades del cliente***

Primeramente, se llevó a cabo una reunión con el personal operador de las máquinas para identificar cuáles son las necesidades. De esta manera se determinó que existen requerimientos por parte del operador y requerimientos por parte de la normativa ISO 9001 a la cual se rige la empresa.

Para establecer el orden de importancia se ha optado por organizar las necesidades de cada una de las máquinas por separado en las tablas 4,5 y 6.

**Tabla 4**

*Necesidades en el abrasímetro*

Núm.	Necesidad	Imp.
1	Ajuste de la profundidad de la probeta	5
2	Ajuste de tamaño de probeta	5
3	Brazo de presión con peso específico	5

<b>Núm.</b>	<b>Necesidad</b>	<b>Imp.</b>
4	Diseño compacto	4
5	Conteo de ciclos	5
6	Apagado automático al finalizar el ensayo	4
7	Bajo consumo energético	2
8	Paro de emergencia	4
9	Facilidad de operación	4

**Tabla 5***Necesidades en el flexómetro*

<b>Núm.</b>	<b>Necesidad</b>	<b>Imp.</b>
1	Material de acuerdo a las normas de calidad	5
2	Elemento de sujeción ajustable	5
3	Conteo de ciclos	5
4	Diseño compacto	4
5	Bajo consumo energético	2
6	Mínimas modificaciones	4

**Tabla 6***Necesidades en el elastómetro*

<b>Núm.</b>	<b>Necesidad</b>	<b>Imp.</b>
1	Detección de grietas en la probeta	5
2	Medición de presión en la probeta	5
3	Conteo de ciclos	5
4	Diseño compacto	3
5	Accionamiento automático	5
6	Fácil operación	2
7	Interfaz amigable con el usuario	5

### **Especificaciones técnicas del sistema**

Una vez establecidas las necesidades del cliente se procede a establecer las métricas, es decir, expresar las necesidades del cliente en términos de ingeniería. Las métricas corresponden a: abrasímetro en la tabla 7, flexómetro en la tabla 8 y elastómetro en la tabla 8.

**Tabla 7**

#### *Especificaciones técnicas del abrasímetro*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
1	Resolución de ajuste	5	<i>mm</i>
2	Fuerza de aplicación en el cabezal	5	<i>N</i>
3	Voltaje nominal de operación	3	<i>V</i>
4	Registro de datos	5	<i>ciclos</i>
5	Arquitectura compatible del microcontrolador	4	<i>Subjetiva</i>
6	Resistencia de materiales de elementos mecánicos	3	<i>Subjetiva</i>

**Tabla 8**

#### *Especificaciones técnicas del flexómetro*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
1	Compatibilidad de elementos mecánicos	5	<i>Subjetiva</i>
2	Voltaje nominal de operación	3	<i>V</i>
3	Registro de datos	5	<i>ciclos</i>

<b>Métrica núm.</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
4	Arquitectura compatible del microcontrolador	4	<i>Subjetiva</i>
5	Resistencia de materiales de elementos mecánicos	3	<i>Subjetiva</i>

**Tabla 9**

*Especificaciones técnicas del elastómetro*

<b>Métrica núm.</b>	<b>Métrica</b>	<b>Imp.</b>	<b>Unidades</b>
1	Precisión y resolución	5	<i>mm</i>
2	Medición de presión	5	<i>N</i>
3	Dimensiones en función de la máquina	3	<i>mm</i>
4	Registro de revoluciones del motor	5	<i>ciclos</i>
5	HMI intuitiva	4	<i>Subjetiva</i>
6	Resistencia de materiales de elementos mecánicos	3	<i>Subjetiva</i>

### **Casa de calidad**

Según Karl Ulrich y Steven Eppinger, la casa de la calidad o matriz QFD es una herramienta gráfica que permite relacionar de manera eficiente las necesidades con las métricas y establecer su importancia para el diseño.

Considerando que el diseño para cada máquina se realiza de manera independiente, cuyas matrices se muestran en las figuras 27, 28 y 29 respectivamente.

Figura 31

Casa de la calidad correspondiente al abrasímetro

Abrasímetro		Métricas							
			1	2	3	4	5	6	
Núm.	Necesidades	Núm. Imp.	Resolución de ajuste	Fuerza de aplicación en el cabezal	Voltaje nominal de operación	Registro de datos	Arquitectura compatible del microcontrolador	Resistencia de materiales de elementos mecánicos	
1	Ajuste de la profundidad de la probeta	5	●			Δ	○	○	
2	Ajuste de tamaño de probeta	5	●	○		Δ		○	
3	Brazo de presión con peso específico	5	○	●		Δ		○	
4	Diseño compacto	4	○		Δ	Δ	Δ	○	
5	Conteo de ciclos	5		○		●	●	Δ	
6	Apagado automático al finalizar el ensayo	4			○	●	○		
7	Bajo consumo energético	2	Δ	Δ	●	Δ	●		
8	Paro de emergencia	4	Δ	Δ	○	Δ	Δ		
9	Facilidad de operación	4	Δ	Δ	○	○	Δ	Δ	
Ponderación Absoluta			123	85	58	118	102	66	552
Ponderación Relativa			22.3	15.4	10.5	21.4	18.5	12	100
Importancia Relativa			1	4	6	2	3	5	

Las métricas correspondientes al abrasímetro indican que se deben brindar mayor prioridad a la resolución de ajuste y al registro de datos cuyos sistemas deben ser compatibles con la arquitectura del microcontrolador original.

**Figura 32**

*Casa de la calidad correspondiente al flexómetro*

Flexómetro		Métricas						
			Compatibilidad de elementos mecánicos	Voltaje nominal de operación	Registro de datos	Arquitectura compatible del microcontrolador	Resistencia de materiales de elementos mecánicos	
Núm.	Necesidades	Núm. Imp.	1	2	3	4	5	
1	Material de acuerdo a las normas de calidad	5	Δ	Δ	Δ	○	●	
2	Elemento de sujeción ajustable	5	●		○	○	●	
3	Conteo de ciclos	5	○		●	Δ	○	
4	Diseño compacto	4	○	Δ	●	○	○	
5	Bajo consumo energético	2	○	●	Δ			
6	Mínimas modificaciones	4	●	○	Δ	●	●	
Ponderación Absoluta			119	39	107	83	153	501
Ponderación Relativa			23.75	7.784	21.36	16.57	30.54	100
Importancia Relativa			2	5	3	4	1	

En este caso, la resistencia de los materiales juntos con la compatibilidad de los elementos mecánicos son las métricas de mayor importancia, seguidos del registro de datos. Esto es indiscutible, debido a que en esta máquina en específico lo que falla principalmente son sus partes mecánicas, las mordazas.

Figura 33

Casa de la calidad correspondiente al elastómetro

Elastómetro		Métricas							
			1	2	3	4	5	6	
Núm.	Necesidades	Núm. Imp.	Precisión y resolución	Medición de presión	Dimensiones en función de la máquina	Registro de revoluciones del motor	HMI intuitiva	Resistencia de materiales de elementos mecánicos	
1	Detección de grietas en la probeta	5	●			○	●		
2	Medición de presión en la probeta	5	○	●		○	○		
3	Conteo de ciclos	5	●		○	●	○	Δ	
4	Diseño compacto	3	Δ	Δ	●			○	
5	Accionamiento automático	5	○	Δ		○		○	
6	Fácil operación	2		Δ	Δ	Δ	●		
7	Interfaz amigable con el usuario	5		Δ		Δ	●		
Ponderación Absoluta			123	60	44	97	138	29	491
Ponderación Relativa			25.1	12.2	8.96	19.8	28.1	5.91	100
Importancia Relativa			2	4	5	3	1	6	

Las métricas de esta máquina tienen su prioridad en una HMI intuitiva, precisión y el registro de datos principalmente en los datos referentes a las revoluciones del motor.

De manera resumida, las métricas para la reopotenciación de las máquinas se centran en la resistencia de los materiales, precisión en el registro de datos y las mejoras que se realicen deben ser de fácil operación.

### Ingeniería inversa

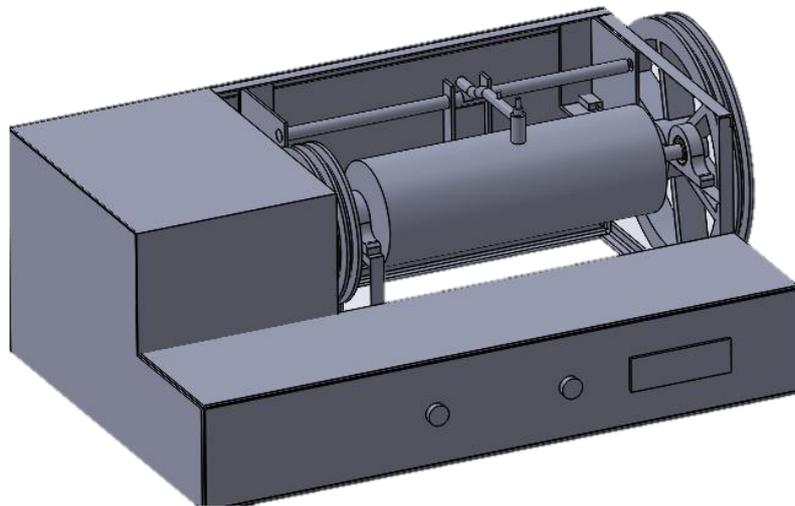
El uso de ingeniería inversa se convierte en instrumento esencial para la automatización de las máquinas en cuestión, esto debido a que se debe conocer el funcionamiento de cada máquina y las partes que las componen para implementar mejoras

basadas en su estado actual. Por lo tanto, es indispensable la obtención tanto del modelo 3D en software CAD de las tres máquinas, así como el esquema del circuito eléctrico.

Es importante resaltar que el modelo 3D obtenido contempla solamente las partes principales de las máquinas, mismas que servirán de base para el diseño de los nuevos componentes de mejora. El modelo del abrasímetro obtenido mediante ingeniería inversa se observa en la figura 30 al igual que su esquema eléctrico en la figura 31.

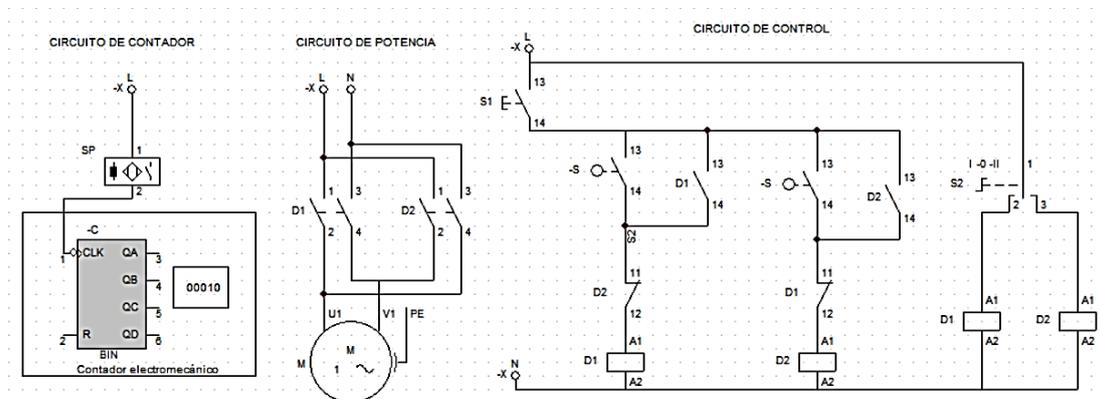
### Figura 34

*Modelo 3D del abrasímetro*



### Figura 35

*Esquema eléctrico del abrasímetro*



El abrasímetro posee un contador electromecánico de 6 dígitos que recibe señal de un sensor de presencia inductivo, dicha señal activa las bobinas de cada dígito del contador. Por otro lado, para el control del motor dispone de dos modos de operación: manual y automático.

#### *Modo manual*

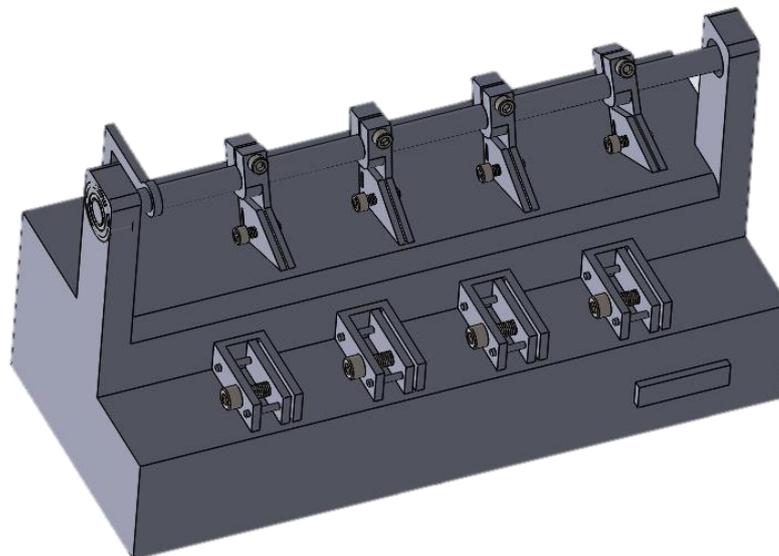
El operador manipula el interruptor de dos posiciones (S2) en la primera posición el motor gira en sentido horario impulsando al carro hacia la derecha. En la segunda posición el motor gira en sentido antihorario impulsando el carro hacia la izquierda.

#### *Modo Automático*

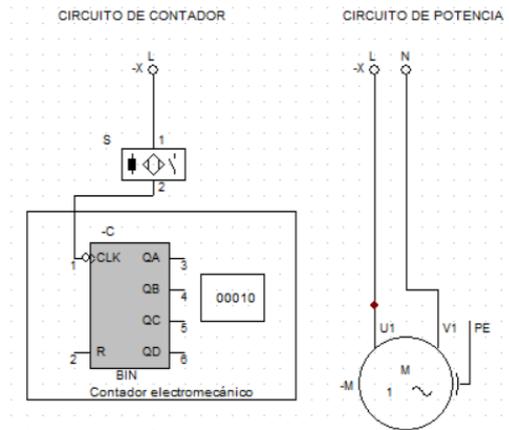
El operador activa un interruptor S1 permitiendo que el carro se desplace hacia la derecha hasta activar el final de carrera 2, en este punto se invierte la polaridad del motor y el carro retorna hasta activar el final de carrera 1. Este ciclo se repite hasta que el operador lo detenga cuando se termine el ensayo.

### **Figura 36**

#### *Modelo 3D del flexómetro*

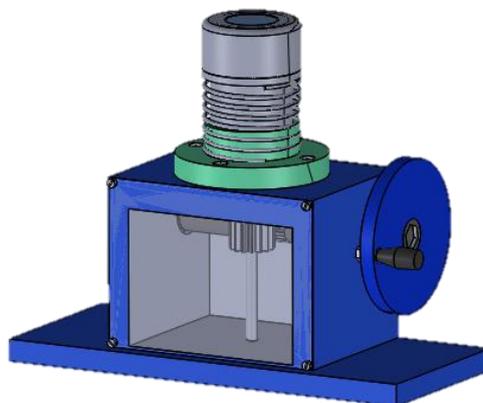


*Nota.* La figura 36 muestra la disposición de las mordazas del flexómetro.

**Figura 37***Esquema eléctrico del flexómetro*

*Nota.* En la figura 37 se visualiza el diagrama eléctrico del flexómetro cuya fase de potencia no dispone de un circuito adicional de control.

Para el conteo de ciclos, el flexómetro dispone de un contador electromecánico del mismo modelo del abrasímetro; mientras que, el movimiento del motor se activa en un solo sentido al conectarlo al tomacorriente de 110 V mediante el operador detiene el movimiento del motor al desconectarlo cada 500 ciclos, como se observa en la figura 34, se trata de un dispositivo de accionamiento únicamente mecánico.

**Figura 38***Modelo 3D del elastómetro*

El funcionamiento del elastómetro se basa en accionamiento netamente mecánico. El operador se encarga de mover la manivela que transmite movimiento hacia un acoplamiento de engranajes corona-tornillo sinfín, este a su vez gira una rosca de 1 mm de avance por vuelta provocando que el embolo presione sobre el centro de la probeta (muestra de cuero).

### **Generación de conceptos**

En esta etapa se plantean las alternativas de solución (mejoras en las máquinas) a las necesidades detalladas anteriormente. La existencia de métodos que se podrían aplicar en esta etapa es variada. Sin embargo, la repotenciación de las máquinas (abrasímetro, flexómetro, elastómetro) tiene requerimientos puntuales, limitando hasta cierto punto la generación de alternativas creativas. Por consiguiente, se ha considerado el método de diseño por caja negra, el cual consiste en generar salidas según el número de entradas (solución en función de las necesidades). A continuación, se analizan las ideas generadas para cada una de las máquinas.

### ***Diseño de concepto para el abrasímetro***

La solución planteada para los ajustes de la probeta se enfoca en aprovechar el movimiento lineal de precisión que tienen ciertos actuadores y la deformación elástica que tienen algunos materiales. Esto debido a que la profundidad en la probeta requiere de un ajuste al inicio del ensayo y otro ajuste durante el desarrollo del mismo, mientras que el ajuste de en el ancho de la probeta solamente requiere de un ajuste al inicio del ensayo.

Entonces, se plantea el diseño de un mecanismo manual para el ajuste del ancho de la probeta y un sistema semiautomático para el ajuste de la profundidad. Para ello, se ha realizado una tabla comparativa de la cual se seleccionará la opción que presenta las mejores características para esta aplicación.

**Tabla 10***Comparación de actuadores*

<b>Característica</b>	<b>Pistón Neumático</b>	<b>Servo actuador</b>	<b>Motor a pasos</b>
<b>Precio</b>	Alto	Medio	Bajo
<b>Resolución</b>	Media	Buena	Buena
<b>Fuente</b>	Neumática	Eléctrica	Eléctrica
<b>Dimensiones</b>	Min 30 mm	Min 30 mm	Min 20 mm
<b>Fuerza / torque</b>	Dependiente de la fuente	Media	Media
<b>Requerimientos adicionales</b>	Válvulas/controlador	Controlador	Controlador

*Nota.* En la tabla 10 y las demás tablas comparativas de diseño de concepto muestran valoraciones subjetivas basadas en búsquedas rápidas en la página de MercadoLibre

En base a las características de: precio reducido, buena precisión y las reducidas dimensiones, se ha establecido el uso de un motor de pasos como la mejor opción, este motor de pasos tendrá un mecanismo de tornillo sinfín para convertir el movimiento rotatorio en movimiento lineal. En lo referente al control automático se planea usar un microcontrolador que en función del número de ciclos que lleva el tambor principal se regule la profundidad conformando un sistema embebido.

Luego de realizar los ensayos el tambor del abrasímetro debe ser limpiado mediante una escobilla. Como un pedido adicional del cliente, solicita la implementación de un mecanismo para acoplar la escobilla en el brazo y este realice la limpieza de forma automática mientras gira el tambor, para ello se diseñará una pieza ajustable de fácil extracción montada sobre el brazo.

Para el conteo del número de ciclos se han considerado tres opciones de contador: mecánico, electromecánico, eléctrico (digital). El contador mecánico y electromecánico presentan la gran desventaja de tener partes móviles, por este motivo su vida útil es reducida en comparación con un contador electrónico. En contraste, el contador digital podría aprovechar el mismo controlador destinado al motor de pasos. Por lo tanto, se implementará un contador electrónico mediante un microcontrolador con salida a una pantalla LCD.

La fuerza aplicada en la probeta está dada por la masa de una pieza cilíndrica colocada en la parte superior del cabezal. Pero, también se debe considerar la masa del brazo que conecta el cabezal con el carro (trineo). Los cálculos para determinar la masa y la fuerza en el cabezal se presentarán en la parte de diseño de detalle.

#### ***Diseño de concepto para el flexómetro***

En base a una inspección previa, se ha logrado identificar la principal causa del mal funcionamiento de las mordazas del flexómetro, pues el espesor de las mordazas superiores es relativamente poco para el esfuerzo que realizan al sujetar las muestras de cuero, por lo tanto, tienden a deformarse. En contraste las mordazas inferiores tienen la rigidez suficiente para soportar las presiones, pero el tornillo con el que ajusta la muestra de cuero no soporta el esfuerzo y deforma el roscado evitando un buen ajuste. Tomando en consideración los aspectos mencionados, se plantea un rediseño de las piezas que conforman las mordazas superiores y un nuevo roscado en las mordazas inferiores.

En cuanto al contador de ciclos, no hace falta un nuevo planteamiento debido a que ya se ha considerado el uso del contador digital en el abrasímetro, en consecuencia, se

#### ***Diseño de concepto para el elastómetro***

Esta máquina requiere de un mayor desarrollo de conceptos, puesto que requiere de un mayor grado de automatización al ser una máquina únicamente de operación manual.

En primer lugar, el movimiento rotatorio del eje horizontal será impulsado por un motor. Reemplazar la manivela por un motor acoplado al mismo eje resulta una buena opción, no obstante, tener una máquina de operación manual puede tener su punto favorable y esto es principalmente la no dependencia de una fuente de energía. De esta manera, se ha llegado a la conclusión de incluir un modo de operación manual (sin energía eléctrica) y el modo de operación automático donde se incluye el motor. Esto sugiere el diseño de un mecanismo de desacoplamiento en la transmisión de potencia. Antes de entrar en detalles del mecanismo de transmisión se debe seleccionar el tipo de motor donde se han tomado en cuenta únicamente los más comunes en aplicaciones de automatización industrial.

**Tabla 11**

*Comparación de motores*

<b>Características</b>	<b>Motor Busheles</b>	<b>Servomotor</b>	<b>Motor a pasos</b>
<b>Velocidad</b>	Alta	Baja	Media/Baja
<b>Torque</b>	Bajo	Medio/Alto	Medio/Alto
<b>Fuente de energía</b>	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
<b>Generación de ruido</b>	Alto	Bajo	Bajo
<b>Requerimientos adicionales</b>	Reductor/Controlador ESC/Generador de pulsos	Driver/Controlador	Driver/Controlador

*Nota.* Para esta tabla 11 se considera ruido al sonido que producen los motores durante su funcionamiento.

Dadas las características: alto torque, buena precisión y un bajo ruido, el motor de pasos presenta las mayores ventajas. En adición, al tratarse de un motor que gira en pasos tiene la ventaja de no requerir un encoder o un sensor adicional para medir el número de

vueltas. Por lo tanto, se solucionan dos necesidades al mismo tiempo: accionamiento automático y conteo de ciclos.

El sensor de presión en la probeta presenta un problema en cuanto a su posicionamiento. La dificultad radica en la disposición que debe tener el sensor para medir la fuerza aplicada con la punta del embolo (punta esférica de 8 mm de diámetro) sobre la superficie de la probeta. Para dar con la solución se recurre a las características de los eslabone en armaduras o estructuras rígidas. Basados en definiciones de la estática (rama de la física), un eslabón rígido trasmite la misma fuerza longitudinal ya sean fuerzas de compresión o de tracción. Entonces, considerando el émbolo como un eslabón rígido, la fuerza aplicada en la probeta por la punta del embolo es la misma fuerza en la base del émbolo, de manera que se ha decidido colocar el sensor comúnmente usado para medir fuerza, una celda de carga, en la base del émbolo.

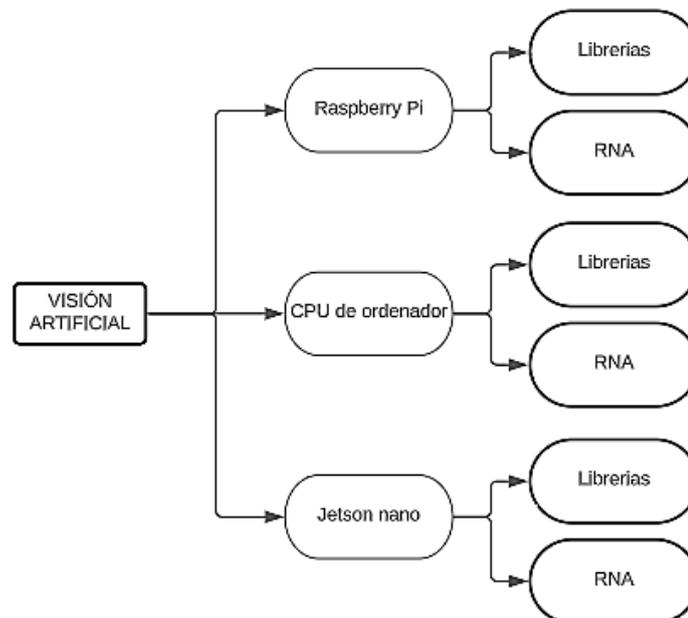
Muchos de los fenómenos físicos se pueden detectar mediante transductores que los convierten en señales eléctricas. Sin embargo, no existen sensores o transductores que permitan la detección del agrietamiento, un defecto producido por el sobreesfuerzo de los materiales rígidos, de manera similar ocurre en la superficie del cuero cuyo agrietamiento se conoce como flor de piel. A nivel de ingeniería existen técnicas para detectar grietas en los materiales, aunque su aplicación requiere de un proceso relativamente extenso.

La técnica del ultrasonido es un método muy conocido en el campo del mantenimiento, pero el costo de los instrumentos y el costo de la aplicación misma del método es muy elevado. Paralelamente a ello, el uso de tintas penetrantes puede ser una alternativa económica pero el procedimiento riguroso junto con el proceso manual lo convierten en un método inviable para el problema planteado. Finalmente, el uso de visión por computador es un tema en auge y su ventaja principal reside en el reconocimiento de patrones sin intervención humana, de esta manera se presenta como una opción altamente eficiente en el ámbito del control de calidad.

El inconveniente que se presenta al usar visión artificial es la necesidad de una cámara con buena resolución y una unidad de procesamiento, esta última depende en gran medida de la aplicación y de la complejidad del algoritmo, es decir mediante librerías de detección de patrones o entrenamiento de redes neuronales artificiales (RNA). Para analizar la viabilidad de las opciones en el sistema de reconocimiento de grietas por visión artificial se presenta un árbol de decisiones en la figura 39.

### Figura 39

*Opciones para la implementación de visión artificial*



El uso de la CPU de un ordenador o el módulo Jetson presentan la ventaja de una gran capacidad de procesamiento debido a su GPU incorporada con los cuales se podría hacer uso de una red neuronal artificial entrenada sin dificultad debido a que el procesador lo permite, el factor inconveniente está en su precio, mismo que es comparable a su capacidad.

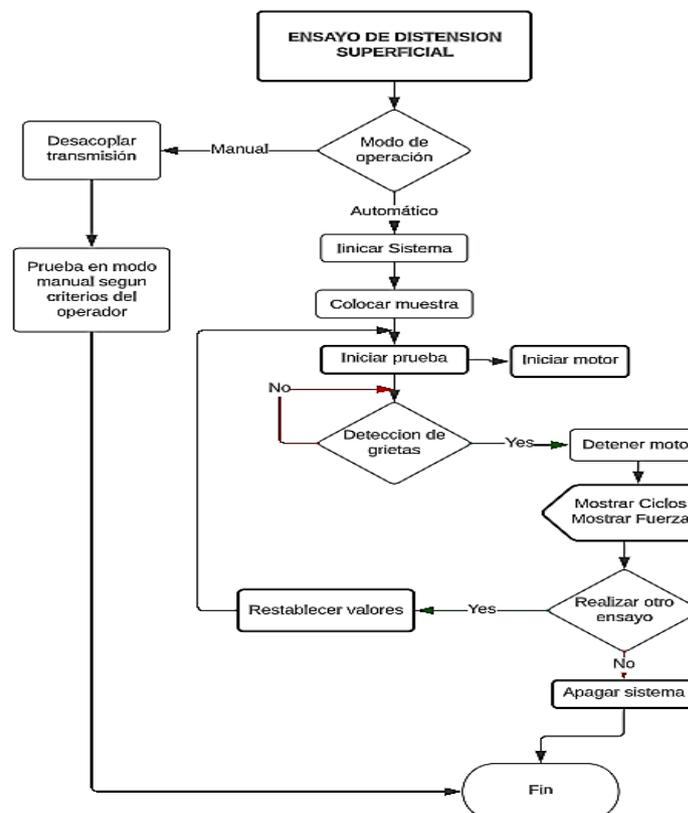
Por otro lado, la Raspberry Pi representa una versión simplificada de un computador personal cuya capacidad es limitada, aunque varía dependiendo de las versiones del modelo. En cuanto al precio es asequible a diferencia de una Jetson. La particularidad que

tiene la Raspberry pi es su conjunto de pines GPIO configurables como entradas o salidas mediante software. Esta característica permitirá tomar lecturas del sensor y al mismo tiempo controlar el motor, motivo por el cual se consolida como una elección viable. Finalmente, se considera uso de librerías debido a la limitada capacidad de la Raspberry pi.

Para una mejor comprensión del concepto se ha desarrollado un diagrama de flujo (figura 40) donde se evidencia de manera gráfica la idea planteada.

**Figura 40**

*Diagrama de funcionamiento del elastómetro*



### Diseño de detalle

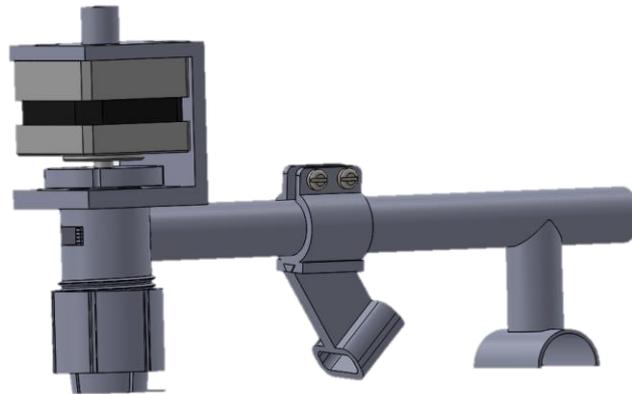
En este punto ya se tienen claras las ideas de las mejoras a realizar en cada máquina, de ahí que es necesario puntualizar con datos específicos y detallados para la fase de construcción.

### **Abrasímetro: diseño mecánico**

Tomando en consideración el uso de un motor a pasos para regular la profundidad de la muestra se ha planteado el siguiente diseño que se muestra en la figura 37.

#### **Figura 41**

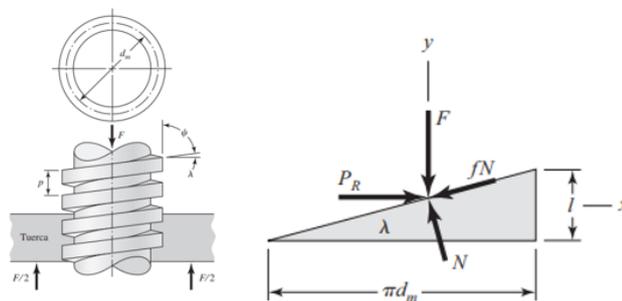
*Diseño mecánico de mejoras en el abrasímetro*



Para seleccionar el motor de pasos en función del torque se ha considerado la fuerza aplicada en la probeta. Considerando que la fuerza aplicada es de 10 N y se emplea un mecanismo de un tornillo de potencia, se obtiene el torque mínimo necesario para la regulación de profundidad.

#### **Figura 42**

*Diagrama de tornillo de potencia*



*Nota.* En la figura 42, se muestra el diagrama un tornillo de potencia para sus respectivos cálculos. Tomado *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* por (Nisbett, 2012)

$$T_R = \frac{F * d_m}{2} * \left( \frac{l + \pi f * d_m}{\pi d_m - f l} \right)$$

Donde:

- $T_R$ : torque necesario de subida
- $F$ : fuerza (10N)
- $d_m$ : diámetro medio del tornillo (8mm)
- $l$ : longitud de paso (1mm)
- $f$ : Coeficiente de fricción (aproximadamente 0.3)

$$T_R = \frac{10 * 0.008}{2} * \left( \frac{0.001 + \pi * 0.3 * 0.008}{\pi * 0.008 - 0.3 * 0.001} \right)$$

$$T_R = 0.04 * \left( \frac{0.0085398}{0.0248327} \right)$$

$$T_R = 0.01375 Nm$$

$$T_R = 0.01375 Nm * \frac{100cm}{1m}$$

$$T_R = 1.375 Ncm$$

**Tabla 12**

*Comparación de motores a paso*

<b>Motor</b>	<b>Torque (Ncm)</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
<b>Nema 8</b>	1.69	20x20x30
<b>Nema 11</b>	5.19	28x28x33
<b>Nema 17</b>	22.03	31x31x35

*Nota.* En la tabla 12 se muestra los datos obtenidos del catálogo que ofrece la tienda virtual Misumi. Tomado de *Catalogo Misumi por* (Misumi, 2023)

Se selecciona el motor nema 11 dadas sus dimensiones y su torque. Para asegurar que el motor realizará correctamente su trabajo, se han aplicado criterios de diseño para cargas frágiles de Robert L. Mott en el libro “Diseño de elementos de máquina”. Según este autor, “El factor de diseño recomendado para cargas estáticas es de 3 a 4. Aunque el motor, no corresponde a un material frágil, si presenta un torque nominal cuyo valor en caso de excederse se consideraría un caso de falla, de forma equivalente al esfuerzo último en un material frágil”.

$$n = \frac{\text{Magnitud disponible}}{\text{Magnitud requerida}}$$

$$n = \frac{5.19 \text{ Ncm}}{1.375 \text{ Ncm}}$$

$$n = 3.77$$

Con un factor de seguridad de 3.77 se garantiza que el motor no tendrá problemas para incrementar o disminuir la profundidad de la probeta. A continuación, se obtiene la resolución de profundidad partiendo de la resolución del motor (1.8° por paso).

$$r_{\text{motor}} = 1.8 \frac{\text{grados}}{\text{paso}}$$

$$r_{\text{tornillo}} = \frac{1\text{mm}}{\text{vuelta}} = \frac{1\text{mm}}{360\text{grados}}$$

$$r_{\text{profundidad}} = r_{\text{motor}} * r_{\text{tornillo}}$$

$$r_{\text{profundidad}} = 1.8 \frac{\text{grados}}{\text{paso}} * \frac{1\text{mm}}{360\text{grados}}$$

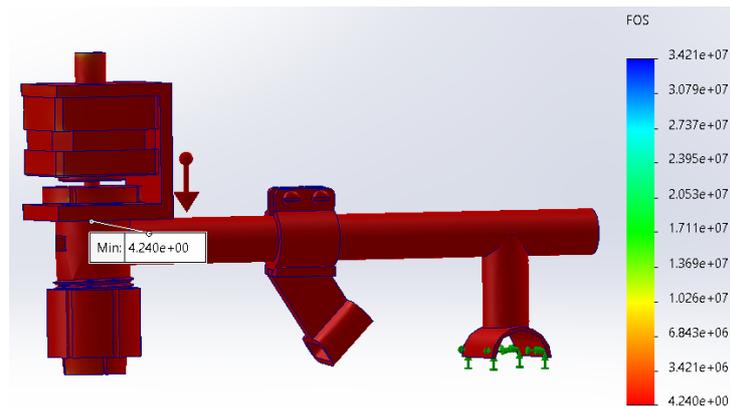
$$r_{\text{profundidad}} = \frac{0.05\text{mm}}{\text{paso}}$$

El funcionamiento de la máquina en condiciones normales no realiza esfuerzos excesivos, de manera que el aluminio podría ser un material con características suficientes para estos componentes. No obstante, la norma ISO 9001 recomienda el uso de acero

inoxidable en máquinas de ensayos de control de calidad. Establecido el material, el siguiente paso es realizar un análisis estático para determinar el factor de seguridad las deformaciones y esfuerzos que podrían esperarse en los elementos.

**Figura 43**

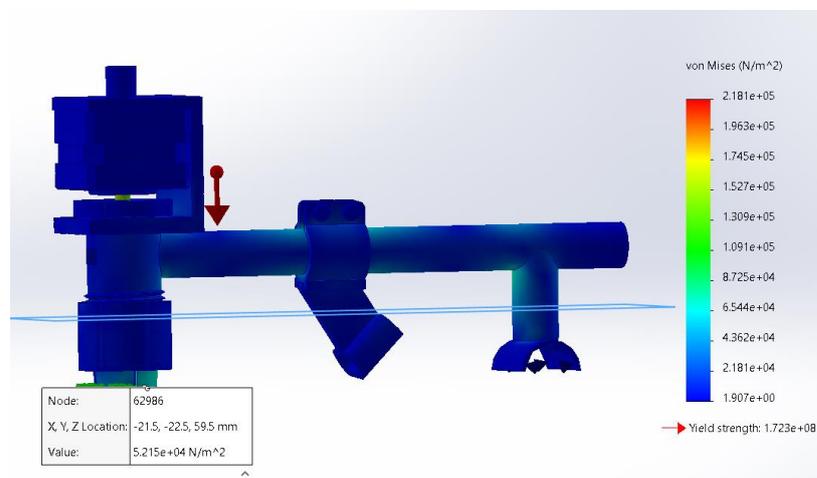
*Factor de seguridad (brazo del abrasímetro)*



El factor de seguridad de 4.2 (figura 43) aparentemente demuestra sobredimensionamiento ya que el acero inoxidable se considera un material dúctil cuyo factor de seguridad debe estar entre 1 y 2 según Robert L. Mott. Pese a ello, no es demasiado inusual considerando que se trata de una máquina de tipo industrial y el sobredimensionamiento tampoco es excesivo.

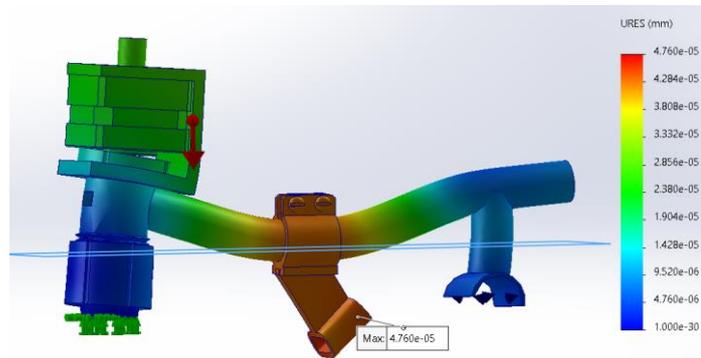
**Figura 44**

*Gráfico de esfuerzos (brazo del abrasímetro)*



### Figura 45

Gráfico de deformaciones (brazo del abrasímetro)

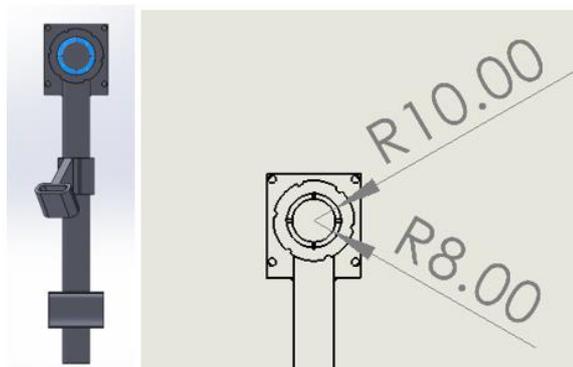


Según el gráfico de deformación (figura 45) muestra un desplazamiento máximo de 0.0004 mm lo que garantiza que los elementos tienen una deformación prácticamente nula para el material seleccionado en condiciones normales de funcionamiento. Además, el máximo desplazamiento se observa en el elemento de acople con la escobilla de limpieza, esta pieza ha sido diseñada para que sea desmontable, por pedido del cliente, de manera que solamente se usa el acople tras finalizar el ensayo como medio de limpieza automática del tambor principal.

Por otra parte, el gráfico de esfuerzos (figura 46) permite calcular la masa adicional o masa complementaria que se requiere agregar en la parte superior, sobre el motor, para que la sumatoria final proporcione una fuerza de 10 N.

### Figura 46

Área de presión (brazo del abrasímetro)



$$A = (\pi * 0.01^2) - (\pi * 0.008^2) \text{ m}^2$$

$$A = 1.13 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

El esfuerzo de Von Mises en el área de la base del cabezal (figura 46) muestra un valor de

$$V = 5.21 * 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$F = V * A$$

$$F = (5.21 * 10^4 \text{ N/m}^2) * (1.13 * 10^{-4} \text{ m}^2)$$

$$F = 5.8873 \text{ N}$$

$$F_{norma} = 10 \text{ N}$$

$$F_{complementaria} = 10 \text{ N} - 5.8873 \text{ N}$$

$$F_{complementaria} = 4.1121 \text{ N}$$

$$M_{complementaria} = \frac{F_{complementaria}}{g}$$

$$M_{complementaria} = \frac{4.1121}{9.81}$$

$$M_{complementaria} = 0.41917 \text{ Kg}$$

$$M_{complementaria} = 419.17 \text{ g}$$

### ***Abrasímetro: diseño eléctrico y electrónico***

Todos los motores de pasos requieren de un driver para acoplar la parte de control con la parte de potencia, el driver A4988 es recomendado por el mismo fabricante del motor (Nema 11) dado que se trata de un motor bipolar de cuatro hilos. Este driver necesita de 4 señales de entrada que determinan los pasos del motor. Un microcontrolador es más que suficiente para enviar las señales al driver.

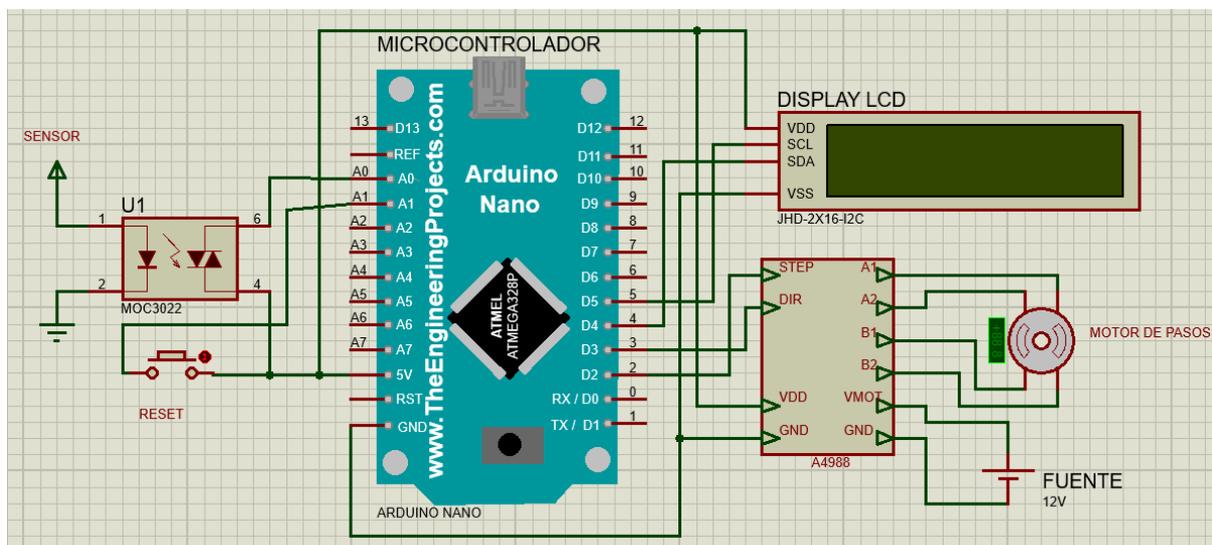
Tratándose de un proceso industrial supondría el uso de un microcontrolador robusto, sin embargo, el proceso para el cual está destinado no es exigente en cuanto a la

frecuencia de operación o capacidad de procesamiento de datos. Además, es preciso usar entradas y salidas de datos puesto que el mismo microcontrolador muestra el número de ciclos mediante una pantalla LCD. Por estos motivos se ha decidido utilizar una placa de la familia de los AVR, específicamente el Arduino nano.

La máquina en cuestión ya cuenta con un sensor de presencia inductivo de 110 V, el cual emite una señal por cada vuelta del tambor de manera que puede ser usado para medir el número de revoluciones mediante un optoacoplador para recibir la señal en el Arduino. El número ciclos o revoluciones se presenta en una pantalla LCD de 16x2 con conexión al Arduino mediante un módulo I2C. En consecuencia, el circuito estaría representado como se muestra en la figura 48.

**Figura 47**

*Diagrama eléctrico (abrasímetro)*



### **Abrasímetro: diseño del programa de control**

Se emplean dos pines analógicos, uno para la entrada de señal del sensor en el pin A0 y el otro para resetear los valores mediante un pulsador en el pin A1. Para la salida de datos se usan los pines 2 y 3 del Arduino, mismos que corresponden a las señales de paso y dirección del motor respectivamente. A la par, los pines 4 y 5 del Arduino (definidos por defecto en la librería) se conectan al módulo I2C para mostrar en la pantalla: el número de

revoluciones en la primera línea y el porcentaje de avance del ensayo en la segunda línea de la pantalla LCD. La figura 44 muestra el código que realiza las acciones de control, lectura y presentación de datos.

**Figura 48**

*Código fuente del programa en Arduino (abrasímetro)*

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <Adafruit_LiquidCrystal.h>
3  #include <Stepper.h>
4
5  Adafruit_LiquidCrystal lcd(0);
6
7  const int sensorPin = A0;
8  const int botonPin = A1;
9  const int totalCiclos = 85;
10
11 int ciclos = 0;
12
13 const int stepsPerRevolution = 200;
14 Stepper stepper(stepsPerRevolution, 2, 3);
15
16 void setup() {
17   lcd.begin(16, 2);
18   lcd.setBacklight(Low);
19
20   pinMode(botonPin, INPUT_PULLUP);
21
22   stepper.setSpeed(100);
23
24   lcd.clear();
25   lcd.setCursor(0, 0);
26   lcd.print("Ciclos:");
27   lcd.setCursor(0, 1);
28   lcd.print("Avance: 0.0%");
29 }
30
31 void loop() {
32   int botonState = digitalRead(botonPin);
33
34   if (botonState == HIGH) {
35     ciclos = 0;
36     lcd.setCursor(8, 0);
37     lcd.print(" ");
38     lcd.setCursor(8, 0);
39     lcd.print(ciclos);
40     lcd.setCursor(9, 1);
41     lcd.print("0.0%");
42     delay(500);
43   }
44
45   int sensorValue = digitalRead(sensorPin);
46
47   if (sensorValue == HIGH) {
48     ciclos++;
49     lcd.setCursor(8, 0);
50     lcd.print(" ");
51     lcd.setCursor(8, 0);
52     lcd.print(ciclos);
53     stepper.step(2);
54     float porcentajeAvance = (float)ciclos / totalCiclos * 100;
55     lcd.setCursor(9, 1);
56     lcd.print(porcentajeAvance, 1);
57     lcd.print("% ");
58     delay(500);
59   }
60 }

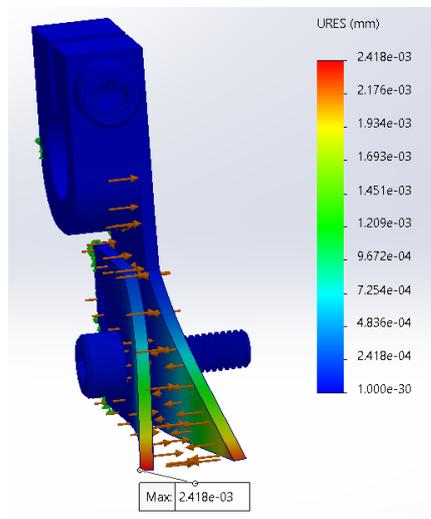
```

### ***Flexómetro: diseño mecánico***

Las dimensiones del contorno de las mordazas superiores están determinadas por la norma, sin embargo, no especifica el espesor que deben tener dejando a criterio del fabricante de la máquina. A través de ingeniería inversa se obtuvo el modelo 3D y se realizó un estudio de deformaciones considerando las dimensiones originales (figura 49)

**Figura 49**

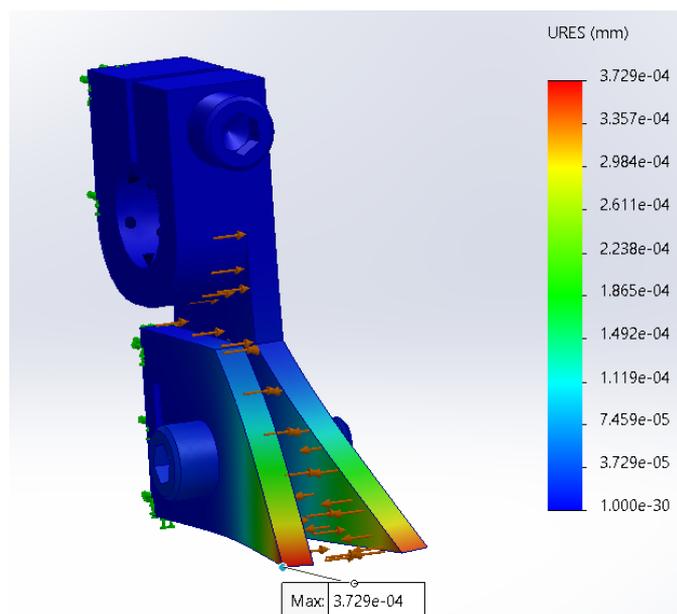
*Análisis de deformaciones en piezas originales (elastómetro)*



La deformación prevista es de 0.0024 mm lo cual no representa un riesgo de falla crítica, por ende, se deduce que la deformación ha ocurrido debido al repetido esfuerzo durante su ciclo de vida. Si bien es cierto, mecanizar piezas idénticas y reemplazarlas sería lo ideal, no está demás alargar la vida útil al rediseñar las piezas incrementando el espesor.

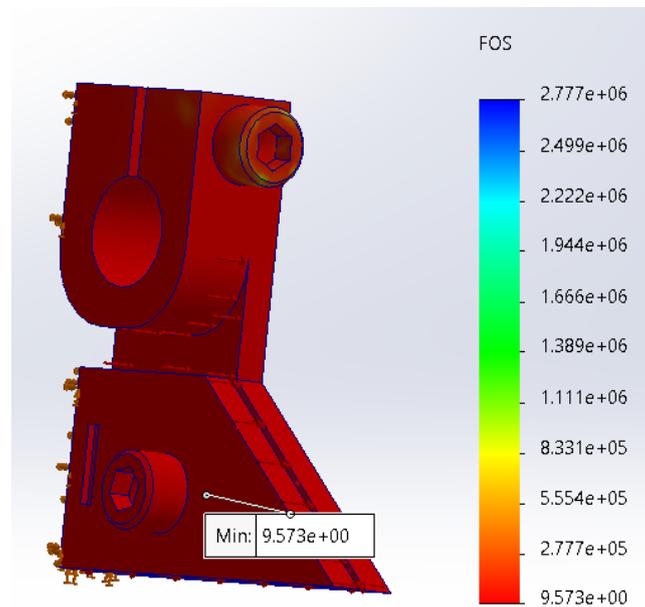
**Figura 50**

*Análisis de deformaciones en piezas rediseñadas (flexómetro)*



## Figura 51

### Factor de seguridad en piezas rediseñadas (flexómetro)



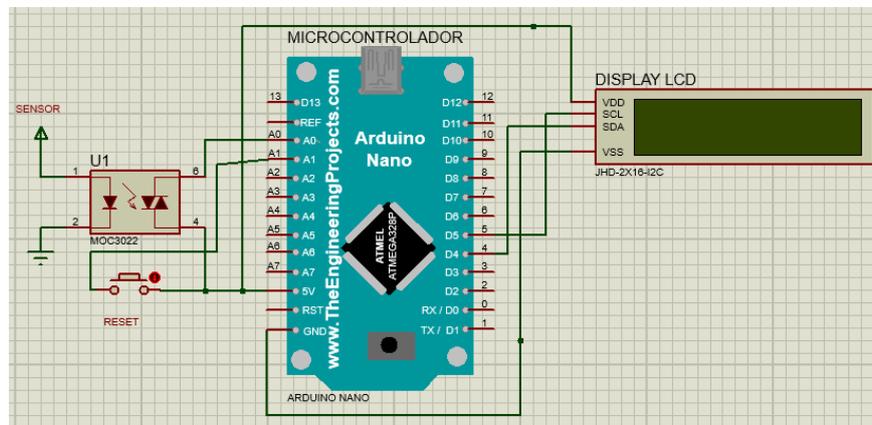
Al incrementar el espesor de las piezas que soportan cargas a 4 mm, la deformación se reduce a 0.00037 mm (figura 50) en el extremo de mayor esfuerzo, así como su factor de seguridad de 9.57 (figura 51) garantizan una mayor durabilidad antes de deformarse.

### ***Flexómetro: diseño eléctrico y electrónico***

Anteriormente se había planteado la idea de usar el mismo sistema de conteo de ciclos empleado en el abrasímetro. La diferencia radica en que este no controla ningún actuador. La entrada de señal del sensor de 110V se recibe mediante un optoacoplador y el número de ciclos se muestra en la pantalla LCD conectada a los pines 4 y 5 mediante un módulo I2C, el diagrama de conexiones se muestra en la figura 52.

Figura 52

Diagrama del circuito de control (flexómetro)



### Flexómetro: diseño del programa del microcontrolador

De igual forma, solamente se eliminan las líneas de código relacionadas con el control del motor incluyendo la librería, el resto del programa sigue la misma lógica de programación mostrada en el abrasímetro, el programa modificado se muestra en la figura 53.

Figura 53

Código fuente del programa en Arduino (flexómetro)

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <Adafruit_LiquidCrystal.h>
3
4  Adafruit_LiquidCrystal lcd(0);
5  const int sensorPin = A0;
6  const int botonPin = A1;
7  int ciclos = 0;
8
9  void setup() {
10     lcd.begin(16, 2);
11     lcd.setBacklight(LOW);
12     pinMode(botonPin, INPUT_PULLUP);
13     lcd.clear();
14     lcd.setCursor(0, 0);
15     lcd.print("Ciclos:");
16 }
17 void loop() {
18     int botonState = digitalRead(botonPin);
19     if (botonState == HIGH) {
20         ciclos = 0;
21         lcd.setCursor(8, 0);
22         lcd.print(" ");
23         lcd.setCursor(8, 0);
24         lcd.print(ciclos);
25         delay(500);
26     }
27     int sensorValue = digitalRead(sensorPin);
28     if (sensorValue == HIGH) {
29         ciclos++;
30         lcd.setCursor(8, 0);
31         lcd.print(" ");
32         lcd.setCursor(8, 0);
33         lcd.print(ciclos);
34         delay(500);
35     }
36 }

```

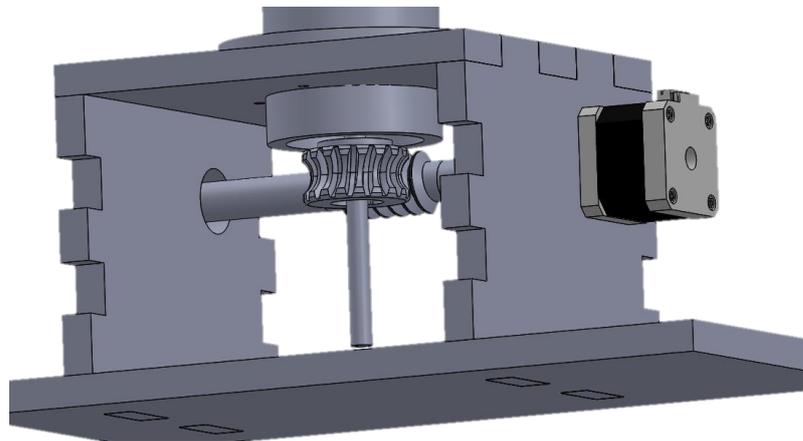
### ***Elastómetro: diseño mecánico***

En la generación de conceptos se había optado por usar un motor de pasos, lo que sigue es determinar el modelo en base a sus características, pero la selección del motor resulta casi imposible si no se tiene la fuerza de torsión requerida. El torque a su vez dependerá directamente de la relación de transmisión según el mecanismo que se aplique. De esta manera, primero será necesario el diseño del mecanismo de acople y transmisión de movimiento.

La implementación de dos modos de operación genera un conflicto debido a que las dos fuentes que proporcionan movimiento concurren en un mismo eje: movimiento proporcionado por el motor y el movimiento proporcionado por el operador a través de la manivela. Inicialmente se había considerado acoplar el motor en el otro extremo del eje de la manivela con lo cual se permite impulsar desde cualquiera de los dos puntos, tal y como se muestra en la figura 54.

### **Figura 54**

*Acoplamiento de motor: opción A (elastómetro)*

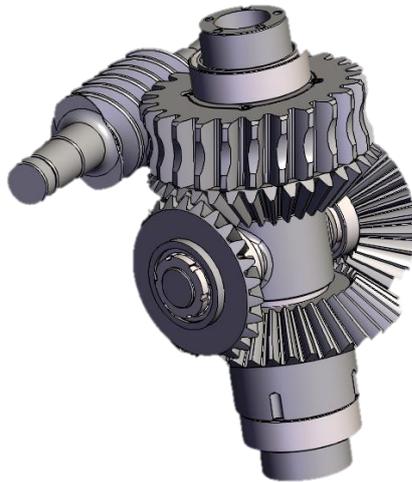


Esta opción presenta el inconveniente de que la manivela del modo manual estará en rotación constante mientras se use el modo automático, esto a pesar de no generar una carga significativa para el motor, no es seguro para el operador.

Por otra parte, el diferencial constituye un mecanismo útil para la transmisión de movimiento en tres ejes.

### Figura 55

*Acoplamiento de motor: opción B (elastómetro)*



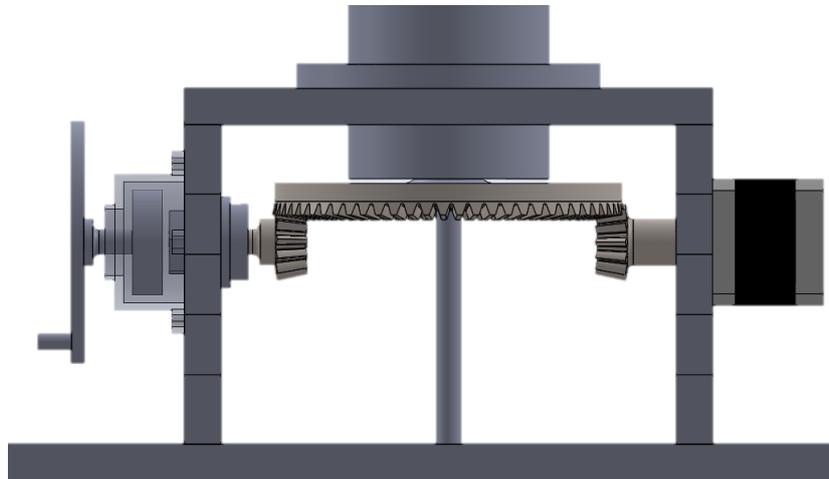
*Nota.* La figura 55 muestra un sistema de transmisión diferencial. Tomada de *GrabCAD* por (Cerpa, 2023)

Este mecanismo transmite libremente el movimiento entre dos ejes cuando se bloquea el tercer eje, lo que en principio serviría para bloquear el accionamiento manual o el del motor, pero dada la complejidad sería demandante un rediseño total incluyendo las demás partes del elastómetro incurriendo en costos elevados.

A fin de crear un mecanismo de acoplamiento sin modificar considerablemente a los componentes originales de la máquina se ha diseñado un sistema de engranajes cónicos como se visualiza en la figura 56.

## Figura 56

*Acoplamiento de motor: opción C (elastómetro)*



Esta idea está basada en la idea original, transmisión de movimiento desde los dos puntos, pero en ejes diferentes acoplados mediante engranes cónicos con relación de 5:1. La separación de ejes era imposible en el diseño original debido al bloqueo del tornillo sinfín. Por el contrario, este mecanismo permite acoplar y desacoplar la manivela según el modo de operación que esté en funcionamiento. La idea fue concebida bajo la premisa de que el principal modo de funcionamiento es automático, con la manivela desacoplada. Pero, en casos de emergencia (no hay electricidad) se acopla la manivela con un movimiento longitudinal sobre el eje del volante y se procederá a realizar el ensayo en modo manual.

Una vez consolidado el método de transmisión de movimiento, se procede a calcular el torque necesario del motor. Según la normativa el émbolo debe aplicar hasta 10 N de fuerza sobre la probeta, si al llegar a dicho valor de fuerza aún no se generan grietas, el ensayo termina y se registran los valores de desplazamiento en función de las revoluciones, así como el valor de la fuerza. El mecanismo para convertir el movimiento circular en lineal es el tornillo de potencia, a este mecanismo se agrega el valor de fuerza adicional máxima de 10 N debido a un resorte metálico.

$$T_R = \frac{F * d_m}{2} * \left( \frac{l + \pi f * d_m}{\pi d_m - fl} \right)$$

Donde:

- $T_R$ : torque necesario de subida
- $F$ : fuerza (20 N)
- $d_m$ : diámetro medio del tornillo (5cm)
- $l$ : longitud de paso (2mm)
- $f$ : Coeficiente de fricción (aproximadamente 0.3)

$$T_R = \frac{20 * 0.05}{2} * \left( \frac{0.002 + \pi * 0.3 * 0.05}{\pi * 0.05 - 0.6 * 0.002} \right)$$

$$T_R = 0.154 Nm$$

$$T_R = 0.154 Nm * \frac{100cm}{1m}$$

$$T_R = 15.4 Ncm$$

*Reducción de esfuerzo por la relación de transmisión*

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{T_{piñon}}{T_{engrane}} = \frac{N_{piñon}}{N_{engrane}}$$

$$\frac{T_{piñon}}{15.4} = \frac{12}{60}$$

$$T_{piñon} = 3.1 Ncm$$

$$T_{piñon} = T_{motor}$$

$$T_{motor} = 3.1 \text{ Ncm}$$

La tabla 12 contiene la lista de los motores de paso más comunes y disponibles en el mercado nacional, de la cual se ha seleccionado el motor Nema 17 dado que las restricciones de tamaño no son muy relevantes en este caso y debido a su alto torque de 22 Ncm.

$$n = \frac{\text{Torque disponible}}{\text{Torque requerida}}$$

$$n = \frac{22 \text{ Ncm}}{3.1 \text{ Ncm}}$$

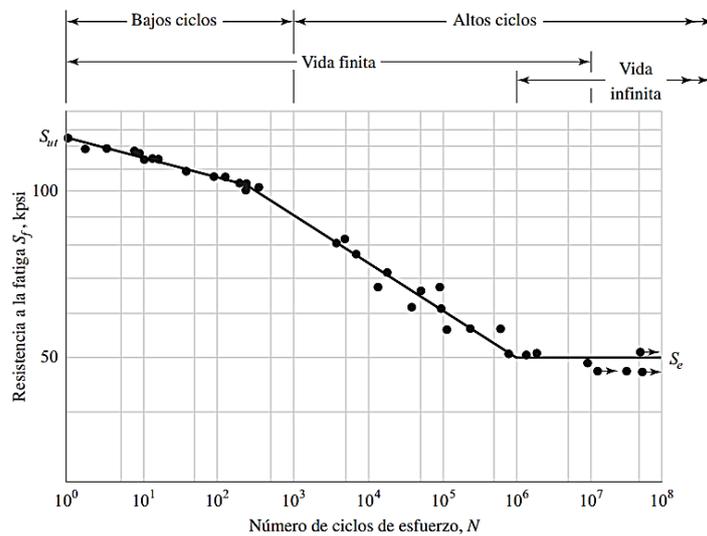
$$\mathbf{n = 7.1}$$

El factor de seguridad de 7 señala un sobredimensionamiento, pero debido a que no existe un valor intermedio de torque nominal, el uso del Nema 17 es viable, garantizando un torque suficiente para mover el mecanismo interno del elastómetro y llevar a cabo el ensayo de manera adecuada.

Para la selección del material de los elementos de transmisión de movimiento, el libro "Diseño de ingeniería mecánica" de Shigley presenta algunas alternativas de material para engranes y piñones. Pero, mediante una investigación se comprobó que los talleres de tornería generalmente realizan mecanizado en acero de fundición gris, al igual que los engranes comerciales normalizados emplean el mismo tipo de acero o su equivalente AISI 1020. Por lo tanto, se utilizará el diagrama de "Ciclos de esfuerzo vs Resistencia a la fatiga" para aceros.

**Figura 57**

Diagrama S-N de aceros



*Nota.* La figura 57 muestra los ciclos de esfuerzo en función de la resistencia a la fatiga del material. Tomado de *Diseño de ingeniería mecánica* por (Nisbett, 2012)

Usando los valores de torque calculados en el paso anterior y usando el hierro fundido como material debido a su disponibilidad para mecanizar, se procede a realizar un análisis estático del mecanismo (figura 54 y 55) para verificar que los elementos no presenten fallas.

**Figura 58**

Deformaciones en elementos de transmisión

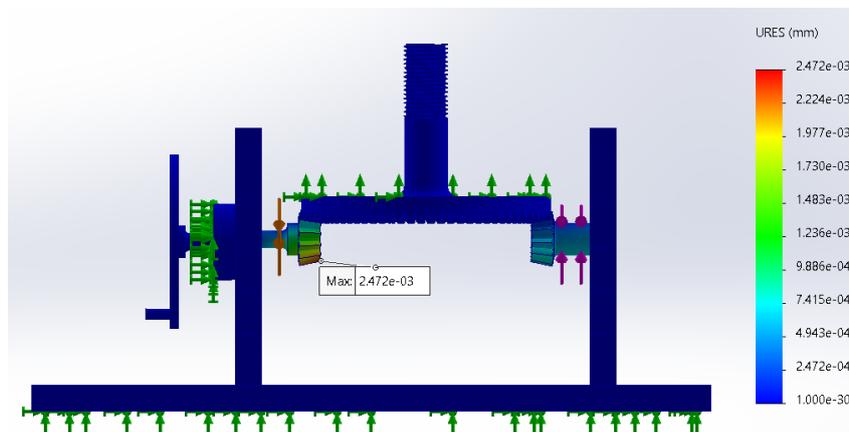
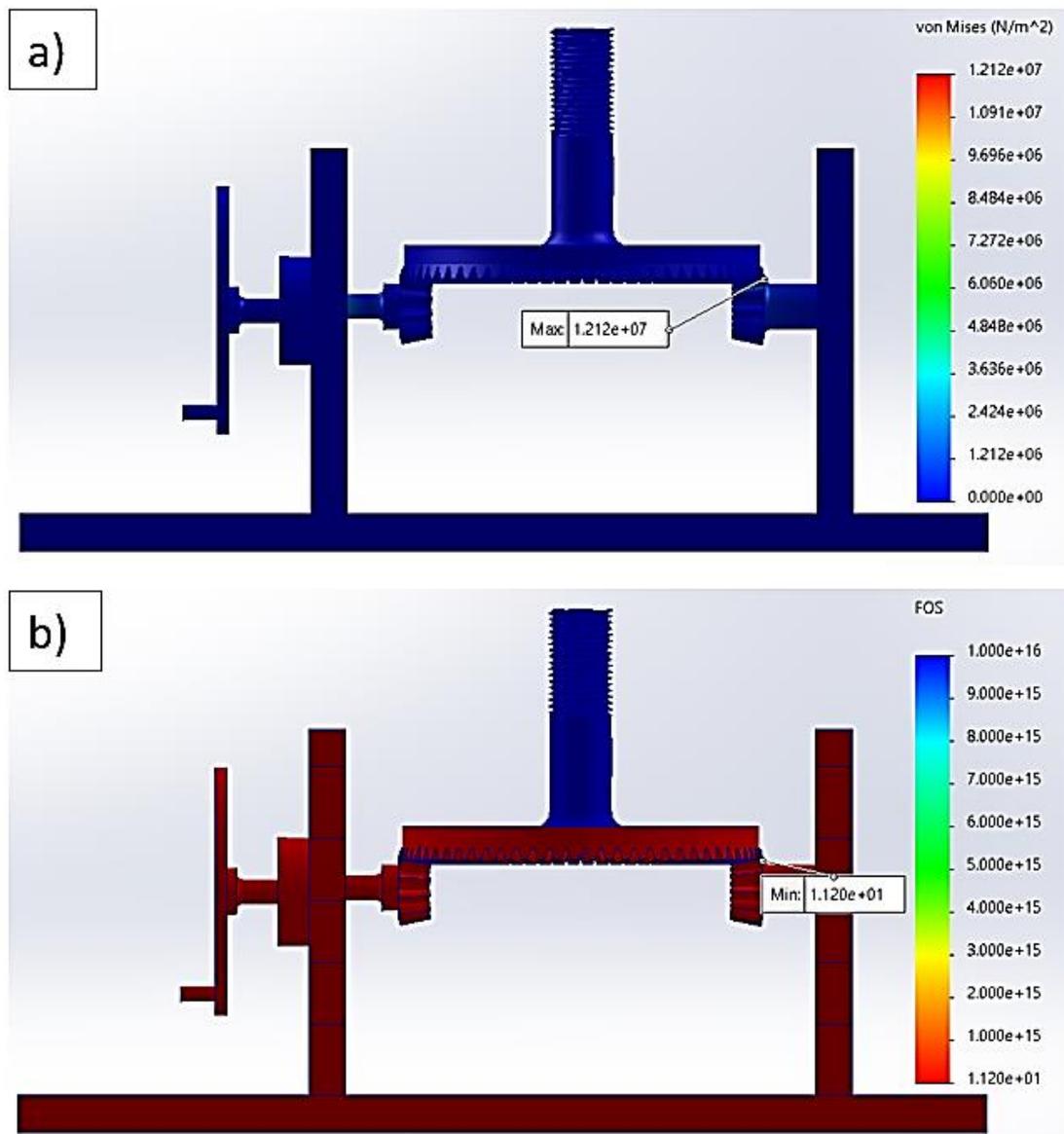


Figura 59

Factor de seguridad en elementos de transmisión



*Nota.* La figura 59 b) presenta el factor de seguridad mínimo en base al esfuerzo máximo de la figura 59 a) en los elementos de transmisión.

El análisis estático presenta una deformación máxima de 0.0024 mm y un factor de seguridad mínimo de 11.2 unidades en las caras de los engranes. El autor Robert L. Mott recomienda un factor de seguridad entre 4 y 8 para elementos diseñados en material frágil bajo cargas dinámicas. Este criterio es aplicable debido a que el torque varía progresivamente conforme se aplique mayor presión sobre la probeta de cuero. Entonces,

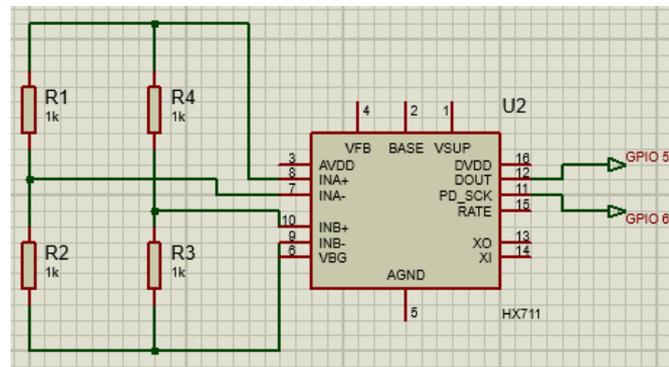
el sobredimensionamiento relativo se justifica con una mayor duración de la vida útil del elemento. Para un valor de resistencia última de 48 kpsi (tabla A-27 del libro de Robert L. Mott) se obtiene un valor aproximado de  $10^7$  ciclos, mismo que representa un alto número de ciclos o ciclos de vida infinito según el diagrama de la figura 57.

### ***Elastómetro: diseño eléctrico***

Cuando se trata de medir fuerza aplicada o peso, el sensor comúnmente usado es la celda de carga cuyo parámetro eléctrico que varía es la resistencia. En consecuencia, requiere de un circuito de acondicionamiento (figura 56) conocido como puente de Wheatstone para posteriormente pasar las lecturas análogas señales digitales mediante un módulo hx711. Este módulo es el que finalmente envía la señal digital a los pines GPIO de la Raspberry pi.

### **Figura 60**

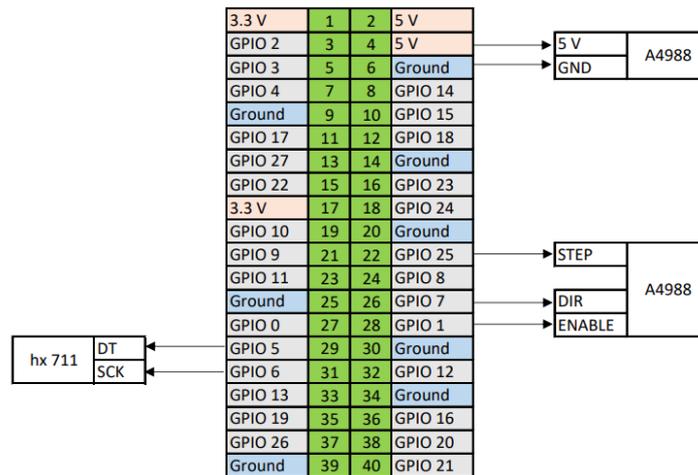
*Acondicionamiento del sensor de fuerza (Celda de carga)*



La selección del modelo de Raspberry pi se ha realizado conforme a su capacidad de memoria RAM, siendo el modelo 4 B el modelo más reciente para desarrolladores que cuenta con versiones de 4 y 8 GB de RAM. En base a recomendaciones de diversas fuentes, tales como videos educativos y foros de desarrollo de algoritmos con visión artificial usando Raspberry pi, 4 GB de memoria RAM es suficiente para aplicaciones con procesamiento de imagen mediante uso de librerías como OpenCV. La asignación de pines GPIO tiene la siguiente distribución.

## Figura 61

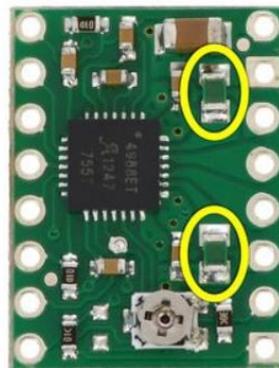
### Distribución de pines GPIO



El driver A4988 opera hasta 2 A de carga máxima según los datos del fabricante (Pololu Robotics Electronics, 2023). Además, se indica la forma de calibrar mediante la resistencia variable que incluye el driver para ajustar la corriente de operación del motor. En este caso, el Nema 17 consume una corriente de 1.3 A y las resistencias se indican la figura 62 y son de 100 ohmios.

## Figura 62

### Resistencias ( $R_{cs}$ ) de ajuste del driver A4988



*Nota.* La figura 62, muestra la posición de las resistencias de censado de corriente. Tomado de *Portador de controlador de motor paso a paso A4988* por (Pololu Robotics Electronics, 2023)

Con el valor de las resistencias de censado de corriente se puede calcular el voltaje de referencia nominal cuyo valor debe ser ajustado manipulando la resistencia variable y midiendo el voltaje entre dicha resistencia y GND. Si bien es cierto, el motor nema 17 trabaja hasta 1.3 A, el fabricante del driver recomienda usar el 70% de la corriente máxima.

$$V_{ref} = 8 * I_{max} * R_{CS}$$

$$V_{ref} = 8 * (1.3 * 0.7) * 0.1$$

$$V_{ref} = 0.728 V$$

Para finalizar con la calibración del driver, se muestra la configuración de los pines MS dependiendo de la resolución deseada.

**Tabla 13**

*Configuración de micropasos*

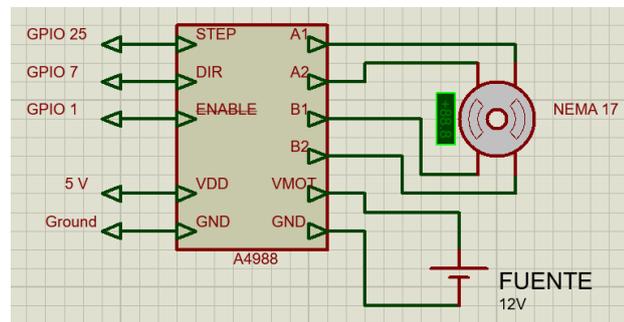
MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	Quarter step
High	High	Low	Eighth step

*Nota.* En la tabla 13 se muestra la configuración de micropasos de acuerdo a la resolución requerida.

La configuración de medio, cuarto u octavo de paso puede resultar útil cuando no se requiere mucho torque, pero si precisión. En este caso, usar los pasos completos permite aprovechar todo el torque que proporciona el motor al mismo tiempo que se tiene una buena resolución debido a la relación de transmisión en los engranes. El diagrama de conexiones del driver quedaría de la siguiente manera.

**Figura 63**

*Circuito de conexión del driver A4988*



La cámara de video constituye el elemento principal de este sistema de visión por computador. Existen proveedores de cámaras dedicada específicamente para visión artificial. Pese a ello, se han considerado solamente dos tipos de cámaras, mismas que poseen características favorables para el proceso en el cual se va a implementar.

**Tabla 14**

*Selección de cámaras*

Características	Cámara Raspberry Pi	Cámara (microscopio) digital USB
Precio	10 \$	20 \$
Resolución	5 MP	1.3 MP
Tipo de conexión	Flex	USB
Zoom	Digital	Digital/Hardware
Voltaje de operación	5V	5V
Magnificación	No	Hasta 500x

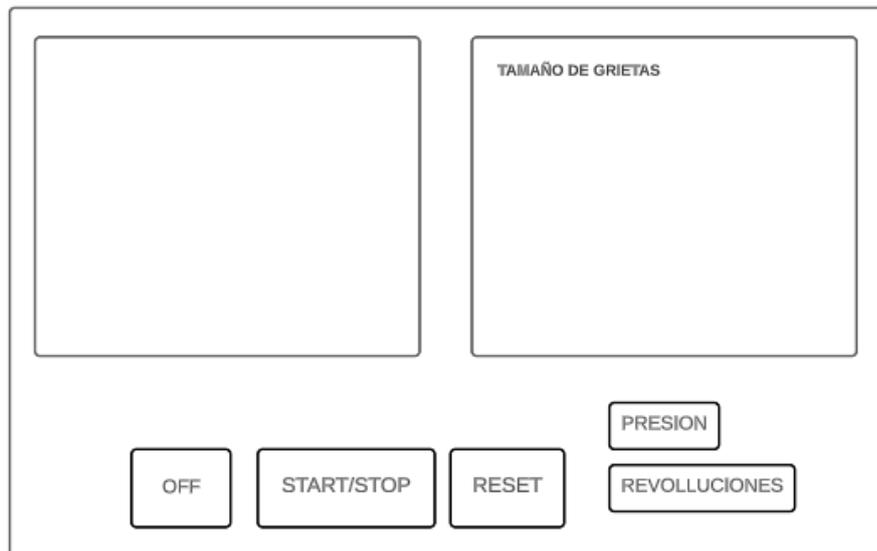
Al contrastar las ventajas de cada uno se establece que la cámara-microscopio contribuye de mejor forma a la detección de grietas gracias a su magnificación de 500x considerando que dichas grietas deben ser inferiores a 0.1 mm. A esto se suma la

disponibilidad de zoom manual lo que permitirá enfocar la imagen sin importar la distancia a la cual este situada la cámara del objetivo. En cuanto a la conexión, no existe ningún problema dado que la placa Raspberry pi dispone de cuatro entradas USB.

### ***Elastómetro: programación de la Interfaz Humano Máquina***

El objetivo de desarrollar una interfaz HMI es proporcionar al operador la capacidad de controlar y observar el proceso en tiempo real sin demasiada complejidad. En consecuencia, para esta parte se ha efectuado una especie de diseño concurrente donde las ideas generadas fueron retroalimentadas y discutidas con el operador de la máquina. Finalmente se establecieron los elementos que tendría la interfaz cuya representación gráfica se visualiza en la figura 64.

- Una única ventana principal segmentada en dos cuadros
- Uno de los cuadros presenta la imagen en tiempo real de la superficie del cuero
- El otro cuadro presenta la detección de grietas (imagen en negativo)
- Un botón de inicio y paro del ensayo
- Un botón para reestablecer los valores una vez terminado el ensayo
- Un botón de apagado del sistema.
- Dos cajas de texto donde se muestre el valor del sensor de fuerza y las revoluciones del motor
- Un indicador de las dimensiones de las grietas
- Dimensiones del panel: sin exigencias, que permita visualizar la imagen y se oprimir los botones sin dificultad es suficiente.

**Figura 64***Diseño de HMI*

Existen programas dedicados para el diseño de interfaces de usuario donde la disposición de los elementos se realiza de manera gráfica. Sin embargo, esto requiere de archivos o librerías adicionales y dado que estamos trabajando sobre el sistema operativo Raspbian, sistema operativo para Raspberry pi, la idea es optimizar recursos en la medida de lo posible. Es esta la razón por la que se ha decidido crear los elementos mediante líneas de código para posteriormente incluir las funciones de lectura de datos y control del motor en el programa.

## Figura 65

### Código fuente del HMI

```

28 class VideoApp:
29     def __init__(self, window, window_title):
30         self.window = window
31         self.window.title(window_title)
32
33         # Crear una ventana de Tkinter
34         self.window = window
35         self.window.title(window_title)
36
37         # Configurar el tamaño de la ventana
38         self.window.geometry("800x400")
39
40         # Configurar el fondo gris de la ventana
41         self.window.configure(bg="gray")
42
43         # Crear un widget Label para mostrar el video
44         self.label = tk.Label(window, width=400, height=300, bg="gray")
45         self.label.pack(side=tk.LEFT, anchor=tk.NW)
46
47         # Crear otro widget Label para mostrar la detección de bordes
48         self.edges_label = tk.Label(window, width=400, height=300, bg="gray")
49         self.edges_label.pack(side=tk.LEFT, anchor=tk.NW)
50
51         # Cerrar la ventana
52         self.window.protocol("WM_DELETE_WINDOW", self.on_close)
53
54 window = tk.Tk()
55 app = VideoApp(window, "ELASTOMETRO")
56 window.mainloop()

```

A esta interfaz se define como programa principal donde se agregan las demás funciones. Para ello, en primer lugar, se agregan las librerías:

- Cv2: librería de OpenCV dedicado al procesamiento de imágenes en tiempo real.
- Rpi.GPIO: librería que permite el uso de los pines GPIO.
- Hx711: librería para decodificar las señales digitales que provienen del módulo.
- Tkinter: librería para control de la interfaz de usuario.

A continuación, se agregan las funciones de control del motor, lectura del sensor, y medición del tamaño de grietas. Todas las funciones tienen comentarios para un fácil entendimiento en caso de que haya la necesidad de modificar el programa o aplicar ingeniería inversa.

```

def start_motor(self, channel):
    # Iniciar el movimiento del motor de pasos en una dirección
    GPIO.output(self.enable_pin, GPIO.LOW)
    if not self.motor_running:
        self.motor_running = True
        motor_thread = threading.Thread(target=self.move_motor)
        motor_thread.start()
        self.start_stop_button.config(text="STOP", bg="red")

def move_motor(self):
    # Controlar el movimiento del motor
    while self.motor_running:
        GPIO.output(self.dir_pin, GPIO.LOW) # Cambiar a LOW si es necesario cambiar la dirección
        GPIO.output(self.step_pin, GPIO.HIGH)
        time.sleep(speed)
        GPIO.output(self.step_pin, GPIO.LOW)
        time.sleep(speed)
        self.step_count += 1

        # Calcular las revoluciones basadas en el número de pasos (1 vuelta = 200 pasos)
        if self.step_count % 200 == 0:
            self.revolutions = self.step_count // 200
            self.revolutions_label.config(text="Revoluciones: {}".format(self.revolutions))
    # Detener el motor y restablecer el botón una vez finalizado
    self.stop_motor()

def read_hx711(self):
    GPIO.setmode(GPIO.BCM)
    while True:
        self.force = (self.hx711.get_weight_mean(20) / 6340) - 1
        # Actualizar el valor de fuerza en la etiqueta correspondiente
        self.force_label.config(text="Fuerza: {}".format(self.force))
        self.window.after(200, self.read_hx711)

```

Finalmente, se crea la función de actualización, esta permite actualizar los fotogramas y procesar de manera simultánea en tiempo real. En esta sección se encuentra la parte fundamental del reconocimiento de grietas.

Existen diferentes métodos para la detección de bordes cuyos algoritmos se pueden interpolar a detección de grietas mediante ajuste de parámetros umbral. Métodos como detección por operador de gradiente, método Laplaciano, método de segmentación y el método más conocido por su robustez, el método de aprendizaje profundo que incluye entrenamiento de redes neuronales.

Ciertamente, en un inicio se tenía la idea de entrenar una red neuronal. Pero se desistió de la idea debido a que requiere de una mayor capacidad de procesamiento y peor

aún, la red no es capaz de reconocer algo que nunca ha sido entrenada. En ese aspecto, tienen la ventaja los otros métodos, sobre todo el método Canny.

El método Canny tiene la particularidad de recibir dos parámetros de entrada para el ajuste de umbral de detección, esto le permite tener un mejor control sobre lo que se detecta y lo que no. Los parámetros se denominan thershold1 y thershold2, mismos que tienen valores de 0 a 255. La implementación de este método se encuentra bajo el comentario “procesar la detección de bordes en la imagen” dentro de la función de actualización.

```
def update(self):
    # Leer un fotograma de la cámara
    ret, frame = self.cap.read()

    if ret:

        # Convertir el fotograma de OpenCV a un objeto de imagen PIL
        image = cv2.cvtColor(frame, cv2.COLOR_BGR2RGB)
        image = Image.fromarray(image)

        # Redimensionar la imagen para que se ajuste al cuadro
        image = image.resize((400, 300))

        # Convertir la imagen de PIL a un objeto de imagen de Tkinter
        self.photo = ImageTk.PhotoImage(image=image)

        # Mostrar la imagen en el Label actualizando la imagen
        self.label.configure(image=self.photo)

        # Procesar la detección de bordes en la imagen
        blurred = cv2.GaussianBlur(frame, (5, 5), 0)
        edges = cv2.Canny(blurred, threshold1=30, threshold2=100)
        edges_image = Image.fromarray(edges)

        # Redimensionar la imagen de bordes para que se ajuste al cuadro
        edges_image = edges_image.resize((400, 300))

        # Convertir la imagen de PIL de bordes a un objeto de imagen de Tkinter
        self.edges_photo = ImageTk.PhotoImage(image=edges_image)
```

```

# Mostrar la imagen de bordes en el Label actualizando la imagen
self.edges_label.configure(image=self.edges_photo)

# Detectar si hay bordes significativos y detener el motor si es necesario
if edges.any() and self.motor_running:
    self.reset_button.config(state=tk.NORMAL)
    self.stop_motor()

contours, _ = cv2.findContours(edges, cv2.RETR_EXTERNAL, cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

# Mostrar el tamaño de las grietas si se han encontrado contornos
if contours:
    self.measure_crack_size(contours)

# Programar la próxima actualización después de 10 milisegundos
self.window.after(10, self.update)

```

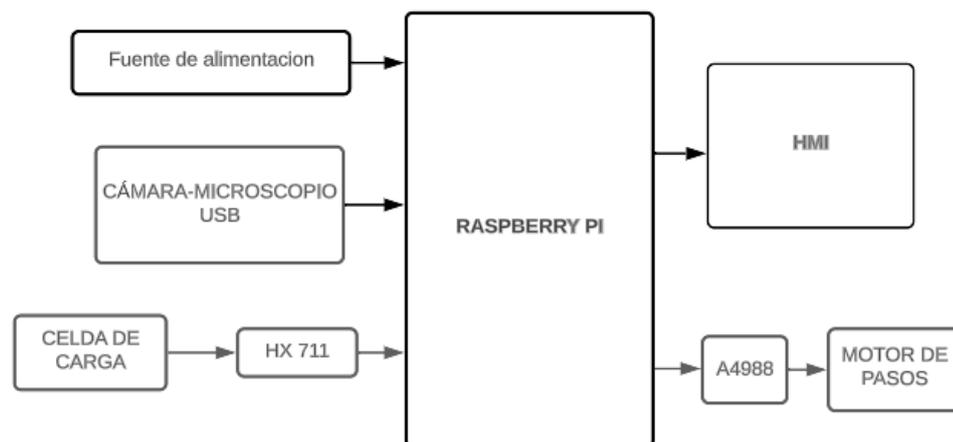
El código fue desarrollado usando el lenguaje de programación Python debido al gran avance que tiene en cuanto a documentación, librerías y algoritmos sobre visión artificial. Además, el sistema operativo Raspbian constituye una rama de los sistemas operativos Linux los cuales incluyen Python por defecto desde su instalación.

### Integración de sistemas

Una vez definidos los componentes, sean mecánicos o eléctricos, se ha realizado una representación en diagrama de bloques.

### Figura 66

*Diagrama de bloques del sistema*



Para alimentar a todos los elementos: sensor, actuador, cámara, microprocesador y pantalla HMI, se requiere de una fuente capaz de suministrar la corriente necesaria. El fabricante de Raspberry pi establece una corriente mínima de 3 A con la cual puede alimentar a los periféricos conectados en los puertos USB o pines GPIO. En función de esta característica, los dispositivos como: cámara, pantalla, módulo hx711 se conectan a la misma alimentación de la placa a 5V; mientras tanto, el driver requiere de 2 A a 12 V para suministrar potencia al motor.

$$I_T = I_{\text{raspberry}} + I_{\text{motor}}$$

$$I_T = 3A + 2A$$

$$I_T = 5A$$

Una fuente de 12V a 10A funcionaria adecuadamente con la condición de incluir un módulo reductor (módulo Buck) para los dispositivos de 5V. En fin, con la finalidad de ahorrar espacio, se ha optado por una fuente de poder “Dual Switching”, la cual proporciona dos salidas de voltaje independientes: una de 12V a 3A y otra de 5V a 4A.

### Figura 67

*Fuente Dual*

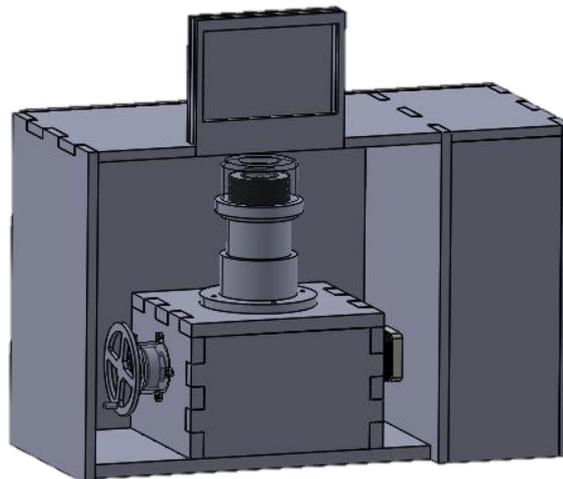


*Nota.* La figura 67 se visualiza una vista frontal de la fuente Dual. Tomada de *MercadoLibre* por (AGElectronica, 2023)

Finalmente, se ha diseñado la estructura donde se prevé la colocación de la cámara junto con la pantalla HMI, así como los demás dispositivos.

### **Figura 68**

*Modelo 3D de sistema mejorado*



Las dimensiones de la estructura se han establecido según las dimensiones de la máquina original, de modo que esta pueda ser extraída en cualquier momento, ya sea para cambiar de probeta o para realizar el ensayo de forma manual.

### **Construcción de los sistemas**

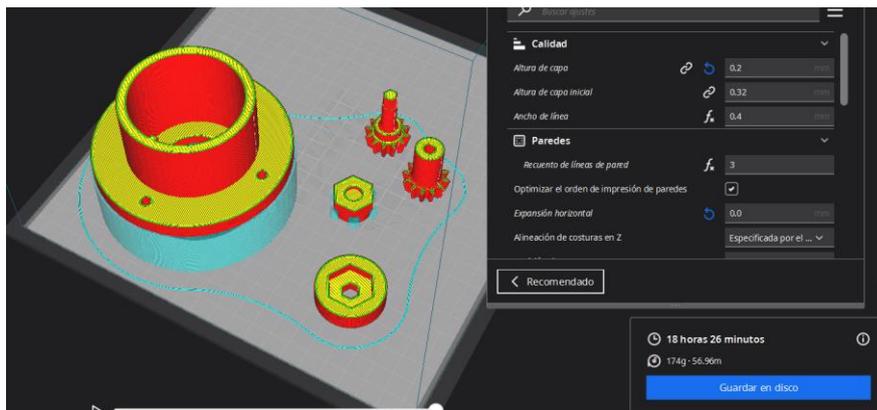
Esta etapa corresponde a la implementación de las mejoras planteadas en la fase de diseño. Sin embargo, mediante el documento FAME-2023-OF-GG-0089, emitido por la empresa, se especifica que debido a cuestiones internas de la empresa no se ha logrado concretar la asignación de recursos en el tiempo establecido. Por lo tanto, como alternativa de solución, nos hemos visto en la necesidad de redireccionar la fase de implementación hacia el prototipado con el fin de realizar pruebas de funcionamiento y tratar de validar o rechazar la tesis planteada.

### ***Estructura mecánica del sistema***

Los componentes internos de la máquina fueron impresos en 3D usando material PLA y PETg, esto debido a que ya se disponía del modelo de las piezas obtenidas mediante ingeniería inversa.

### **Figura 69**

*Parámetros de impresión 3D*



La estructura mecánica tuvo que ser modificada para la construcción en un material diferente. Debido a que la estructura externa no está expuesta a esfuerzos se ha realizado el corte de las piezas en MDF mediante corte laser para mantener relativa precisión.

### **Figura 70**

*Estructura*



Una vez armada la estructura, se colocan los elementos que van al interior del Elastómetro (sistema de engranajes y sensor de fuerza junto con su circuito de acondicionamiento).

### Figura 71

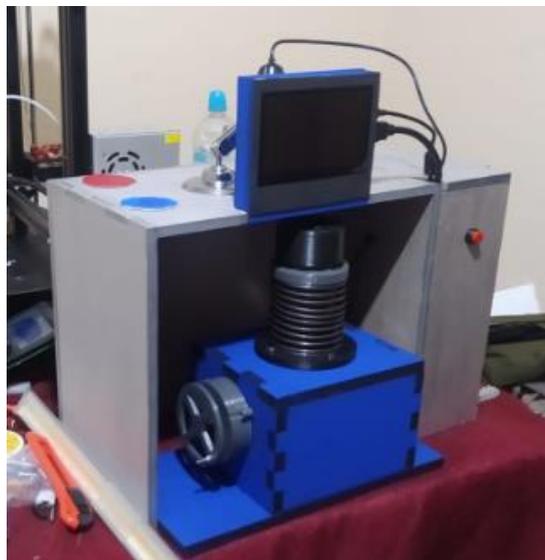
*Componentes internos*



Luego, los componentes externos se colocan verificando que exista el espacio necesario para la conexión de los cables del sensor y los cables del motor.

### Figura 72

*Estructura mecánica final*



### ***Instalación del sistema electrónico***

Dada la condición de prototipo, los componentes electrónicos como el módulo hx711 y el driver fueron montados sobre espadines hembras soldados sobre una placa perforada. La conexión se realizó mediante cables flexibles entre dispositivos, cable USB para la conexión de la cámara y cable HDMI para la conexión con la pantalla HMI.

Inicialmente, se fijan los componentes por separado asegurándolos con pernos M2 y M3 para evitar que fallas por desconexiones no previstas.

### **Figura 73**

*Instalación de componentes electrónicos*



A continuación, se conectan los dispositivos a la unidad central en este caso la placa Raspberry pi y la respectiva fuente de alimentación.

### **Figura 74**

*Conexión de componentes electrónicos*

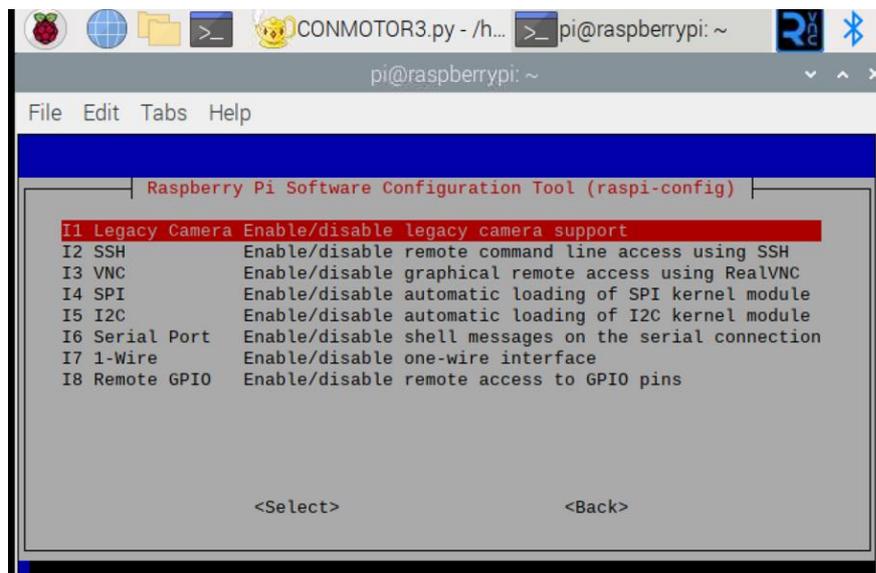


### **Instalación del sistema de reconocimiento de grietas**

Inicialmente, se debe cargar el sistema operativo mediante una memoria SD. Luego, configuramos la conexión SSH para realizar las pruebas respectivas y depuración del código en caso de ser necesario. Para ello se usa el comando “sudo raspi-config”, a continuación, se habilitan las conexiones SSH y el reconocimiento de entrada de cámara.

#### **Figura 75**

##### *Configuración inicial*



Con estas características habilitadas ya se puede acceder remotamente al dispositivo Raspberry pi y descargar ahí el programa a ejecutar. En caso de que no el programa no reconozca alguna librería se debe actualizar mediante el comando: *sudo apt-get install 'librería'*. El sistema operativo trae un editor de código por defecto llamado Geany programmer's Editor con el cual se realizarán las pruebas del programa. Tras ejecutar el archivo de programa.py se muestra la interfaz en la pantalla.

**Figura 76***Interfaz de usuario*

Como se puede observar en la imagen, el programa está detectando grietas y marca el tamaño total, pero estos no son las grietas reales, así que necesita un ajuste de los parámetros *threshold1* y *threshold2* y ajustes en el enfoque de la cámara para un correcto funcionamiento. Los ajustes finales se detallarán en la fase de pruebas.

## Capítulo IV

### Pruebas y resultados

En el presente capítulo se realizan las pruebas de funcionamiento y su valoración en base a análisis de datos estadísticos. Se contempla el análisis de la precisión del sensor y la detección de grietas (flor de piel) en diferentes muestras de cuero.

#### Figura 77

*Partes del elastómetro mejorado*



Donde:

- 1) Botón de ON/OFF.
- 2) HMI.
- 3) Zona de colocación de muestra.
- 4) Acoplamiento y desacoplamiento para uso manual.
- 5) Caja de circuitos.

## Pruebas de funcionamiento y resultados

Las siguientes pruebas se enfocan en comprobar el correcto funcionamiento del sistema automático y manual enfocando en comparar los tiempos que toman en cada modo de operación.

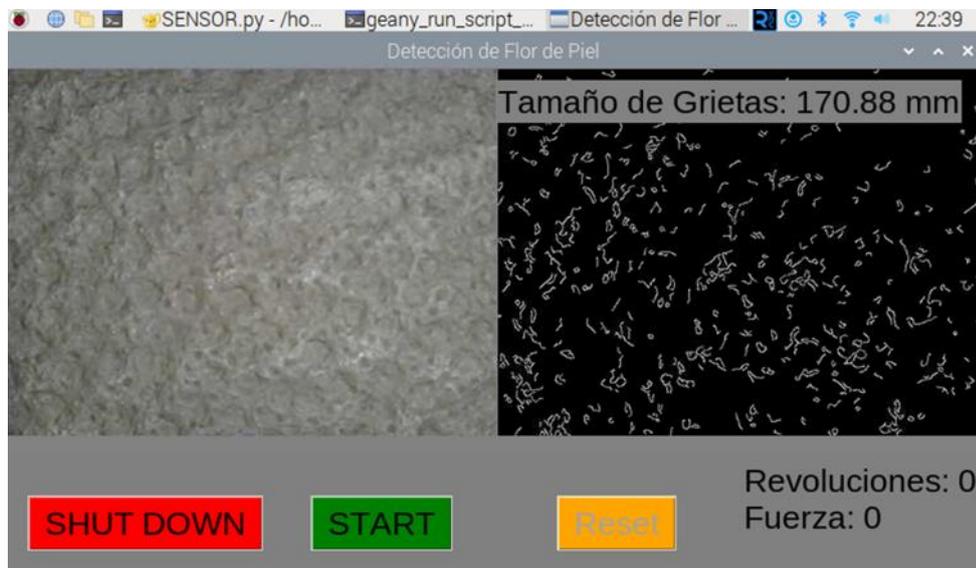
### Pruebas de detección

Esta prueba consiste en determinar si la detección es correcta, de lo contrario se realizará un ajuste de parámetros. Las pruebas se realizarán en los estados de reposo y en estado extendido usando dos de las muestras más comunes y diferenciadas que se utilizan en el calzado: Tipo Coyote y Tipo Nobuck.

Comenzamos con valores de **parámetros  $threshold1=50$  y  $threshold2=100$**

## Figura 78

### Prueba 1 de detección



Los patrones intrínsecos del cuero tienen cierto grado de porosidad, motivo por el cual la detección genera falsos positivos marcándolos como grietas. Ahora probamos con  **$threshold1=100$  y  $threshold2=200$** .

**Figura 79***Prueba 2 de detección*

Como se observa en la figura 79, la detección ha mejorado en gran medida, pese a ello, no es suficiente dato que aun detecta el patrón rugoso del cuero como si fuera un defecto. Continuamos variando el ajuste de umbral: ***threshold1= 150 y threshold2=225***

**Figura 80***Prueba 3 de detección*

El error se reduce aún más, pero no es suficiente, así que seguimos variando los parámetros: ***threshold1= 225 y threshold2=255***

**Figura 81***Prueba 4 de detección*

Con estos valores, la detección queda configurada correctamente en la posición de reposo de la probeta, de modo que el programa permitirá iniciar la prueba.

Teniendo ajustado los parámetros iniciales, ahora corresponde configurar los parámetros para la detección en estado extendido de la probeta, para ello se ha procedido a mover manualmente la manivela hasta que se produzca la grieta para verificar si el algoritmo es capaz de detectar el defecto en el cuero.

**Figura 82***Prueba 5 de detección*

Luego de haber realizado movimiento manual llega a un punto donde se produce la rotura de flor como “zonas blanquecinas” como si fueran “burbujas”, esto a criterios del operador de la máquina se conocen como grietas en el cuero. Ahora es momento de realizar pruebas en modo automático.

### Figura 83

#### *Prueba 6 de detección*



El sistema detecta con gran facilidad, finalmente se requiere ajustar el factor de escala para detener el ensayo cuando las grietas sean de una longitud mayor a 0.1 mm o la fuerza aplicada supere los 10 N.

**Figura 84***Prueba 7 de detección*

El ajuste de factor de escala se ha realizado usando una línea de 1 mm impresa sobre una hoja y colocada como muestra, de tal forma que el sistema corrobore su medida.

**Figura 85***Prueba 8 de detección*

En este punto, la detección es mucho más precisa al detectar grietas cercanas o inferiores a 0.1 mm. Manteniendo esta calibración se han realizado pruebas del porcentaje de detección y pruebas de duración del ensayo.

### **Análisis de precisión del sensor**

La precisión del sensor de fuerza es un parámetro de gran importancia debido a que los valores proporcionados por este sensor se convierten en un criterio para determinar la calidad del cuero en caso de no producirse las grietas, de manera que, usando herramientas de Excel se realizara el coeficiente de variación para determinar que tanto puede variar el valor del sensor con respecto a su media.

### **Figura 86**

*Cálculo del coeficiente de variación*

	Fuerza
	10.032
	10.041
	9.975
	9.958
	10.033
	10.024
	10.056
	9.956
	10.052
	9.967
Media	10.0094
Desviacion Estándar	0.04047
Coeficiente de varianza	<b>0.40432</b>

Para evitar errores no asociados a la precisión del sensor, se han tomado solamente los datos del sensor en torno a la fuerza límite de 10 N. Según el coeficiente de varianza, el sensor envía datos con una precisión de  $\pm 0.4\%$ , lo que sugiere datos confiables para el sistema.

**Validación del sistema****Tabla 15***Porcentaje de detección*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Detección Manual</b>	<b>Detección Automática</b>	<b>Porcentaje de detección</b>
<b>1</b>	4	3	0.75
<b>2</b>	5	3	0.6
<b>3</b>	3	3	1
<b>4</b>	4	4	1
<b>5</b>	5	4	0.8
<b>7</b>	6	5	0.83
<b>8</b>	5	5	1
<b>9</b>	3	2	0.66
<b>10</b>	3	3	1
<b>11</b>	4	3	0.75
<b>12</b>	2	2	1
		<b>Total promedio</b>	<b>0.74</b>

Tras realizar pruebas de funcionamiento se obtiene que la máquina detecta el 74% de las grietas generadas en la superficie del cuero. Este porcentaje de detecciones realizadas, debido a la lógica del algoritmo, corresponde las grietas de mayor tamaño, lo cual compensa el bajo porcentaje puesto que las detecciones realizadas no se basan en el número de grietas sino en su tamaño.

### **Pruebas mediante ensayo automático**

Para determinar si existe una diferencia significativa entre la media de tiempo empleado en el ensayo usando la función automática y la media de tiempo mediante operación manual, se realizaron pruebas de duración del ensayo.

**Tabla 16**

*Pruebas de duración del ensayo: Nobuck-Pliego1*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	19	10.20	15.9
2	20	9.98	16.1
3	19	10.14	15.9

**Tabla 17**

*Pruebas de duración del ensayo: Nobuck-Pliego2*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	18	9.58	15.9
2	20	10.32	16.2
3	20	10.4	16.2

**Tabla 18**

*Pruebas de duración del ensayo: Coyote-Pliego1*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	18	8.29	15.6
2	18	8.9	16.3
3	20	9.12	16.2

**Tabla 19***Pruebas de duración del ensayo: Coyote-Pliego2*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	20	10.45	16.2
2	21	11	16.3
3	20	10.55	16.2

Como se puede apreciar en los datos de tiempo en las tablas, los valores de tiempo rondan los 16 segundos, para ser exactos obtenemos el valor promedio.

$$t_{promedio} = \frac{\sum t_n}{n}$$

$$t_{promedio} = \frac{15.9 + 16.1 + 15.9 + 15.9 + 16.2 + 16.2 + 15.6 + 16.2 + 16.3 + 16.2 + 16.3 + 16.2}{12}$$

$$t_{promedio} = 16.1 \text{ segundos}$$

El tiempo aproximado de ejecución del ensayo en modo automático es de 16.1 segundos, obviamente este valor puede disminuir si el cuero seleccionado es de mala calidad y el defecto (rotura de flor de piel) se produce antes de llegar a los 10 N de fuerza aplicada. Las muestras proporcionadas por la empresa superaron el ensayo casi en su totalidad para los dos tipos de cuero.

### ***Prueba mediante ensayo manual***

En ensayo manual se lo realiza bajos criterios del operador, lo cual recae en valoraciones subjetivas con respecto a la detección de grietas, además para el modo manual no está disponible el sensor de presión llevando a no tener una referencia sobre cuando detener el ensayo para un operador poco experimentado. Usando el conocimiento adquirido durante las conversaciones y reuniones llevadas a cabo dentro del área de control de calidad, se han realizado pruebas de operación manual en el prototipo.

**Tabla 20***Pruebas de ensayo manual: Nobuck-Pliego1*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	20	60
2	20	56
3	20	55

**Tabla 21***Pruebas de ensayo manual: Nobuck-Pliego2*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	20	57
2	20	58
3	20	59

**Tabla 22***Pruebas de ensayo manual: Coyote-Pliego1*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	20	50
2	20	49
3	20	45

**Tabla 23***Pruebas de ensayo manual: Coyote-Pliego2*

<b>N° de Prueba</b>	<b>Ciclos</b>	<b>Tiempo (s)</b>
1	20	44
2	20	50

N° de Prueba	Ciclos	Tiempo (s)
3	20	40

Es importante volver a recalcar que los datos de ensayo manual pueden estar sesgados debido a la falta de experiencia o subjetividad del operador.

### Figura 87

*Cálculo del promedio de tiempos de operación*

	Manual	Automatico
	60	15.9
	56	16.1
	55	15.9
	57	15.9
	58	16.2
	59	16.2
	50	15.6
	49	16.3
	45	16.2
	44	16.2
	50	16.3
	40	16.2
Media	51.91667	16.08333

Se procede a calcular la relación de porcentajes de los tiempos de operación.

$$n = \frac{\text{tiempo de operacion en automático}}{\text{tiempo de operacion manual}}$$

$$n = \frac{16.08}{51.92}$$

$$n = 0.3097$$

El resultado de los datos en bruto predice una reducción del tiempo a 30.97% del tiempo inicial, no obstante, se debe corroborar mediante un análisis estadístico.

## Validación de hipótesis

La hipótesis planteada se establece como:

¿La repotenciación y el mejoramiento del laboratorio de control de calidad mediante la automatización de los equipos de ensayo de fricción, elasticidad y flexión contribuirá a la empresa FAME a optimizar las pruebas de control de calidad según la normativa requerida?

Para validar la hipótesis, el análisis se centra en dos aspectos importantes:

- La reducción del tiempo en los ensayos de control de calidad
- Adquisición de datos exentos de apreciaciones subjetivas

Muchos autores de libros de estadística recomiendan el uso del muestreo t-Student para el análisis de muestras reducidas. Con esto en mente, se plantea la hipótesis nula y la hipótesis alternativa de la siguiente manera:

- H<sub>0</sub>: La media del tiempo en la ejecución de ensayos de distensión realizados por la máquina en modo automático es igual a la media del tiempo de ejecución de ensayos de forma manual.
- H<sub>a</sub>: La media del tiempo de en la ejecución de ensayos de distensión realizados por la máquina en modo automático es significativamente menor a la media del tiempo de ejecución de ensayos de forma manual.

Estadístico de prueba:  $t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}}$

Donde:

- $S_d = \sqrt{\frac{(d_i - \bar{d})^2}{n-1}}$
- $\bar{d}$ : Promedio de las diferencias
- $S_d$ : Desviación estándar

A continuación, se procede a calcular  $\bar{d}$  y  $S_d$  usando las funciones de Excel.

**Tabla 24***Tabulación de datos de tiempo*

N°	Manual [s]	Automático [s]	Diferencia
1	60	15.9	44.1
2	56	16.1	39.9
3	55	15.9	39.1
4	57	15.9	41.1
5	58	16.2	41.8
6	59	16.2	42.8
7	50	15.6	34.4
8	49	16.3	32.7
9	45	16.2	28.8
10	44	16.2	27.8
11	50	16.3	33.7
12	44	16.2	23.8

$$\bar{d} = 35.833$$

$$S_d = 6.624$$

$$n = 12$$

$$t = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} = \frac{35.833}{6.624/\sqrt{12}}$$

$$t = 18.73$$

$$gl = (n - 1) = 11$$

Para un nivel de confianza del 95%:  $\alpha = 0.05$

**Figura 88**

Selección del valor crítico

r	1 - $\alpha$							
	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947

Nota. La figura 88 muestra la tabla de valores de la tabla t-Student. Tomada de *Estadística descriptiva e inferencial* por (Zamora, 2003)

$$t = 1.796$$

Se dice que, si el estadístico de prueba es mayor que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula.

$$t > t_{(1-\alpha), (n-1)}$$

$$18.73 > 1.796$$

Evidentemente, el estadístico de prueba calculado es de 18.73, un valor significativamente superior al valor crítico de 1.796, esto significa que se encuentra en la zona de rechazo. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna concluyendo que la media del tiempo de en la ejecución de ensayos de distensión realizados por la máquina en modo automático es significativamente menor a la media del tiempo de ejecución de ensayos de forma manual.

La adquisición de datos precisos y confiables es esencial para la eficiencia de las pruebas de control de calidad, no hace falta un análisis detallado para argumentar que un

sistema automatizado presenta un mejor desempeño en contraste con la operación de manual cuyos errores son inherentes debido al factor humano.

En base a lo expuesto anteriormente, se prueba que la repotenciación y el mejoramiento del laboratorio de control de calidad mediante la automatización de los equipos si contribuiría a la optimización de las pruebas de control de calidad cumpliendo con las normativas nacionales e internacionales.

### **Análisis de costos**

El análisis de costos contempla los valores que implican la adquisición de materiales, componentes y dispositivos empleados en el desarrollo del prototipo. Sin embargo, para una implementación del sistema real se prevé un costo mayor debido al uso de materiales mucho más resistentes.

**Tabla 25**

*Costos de los componentes*

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
RaspberryPi 4	1	\$ 250	\$ 250
Pantalla 7 pulgadas	1	\$ 80	\$ 80
Memoria SD	1	\$ 15	\$ 15
Cámara- microscopio USB	1	\$ 20	\$ 20
Motor Nema 17	1	\$ 15	\$ 15
Celda de carga	1	\$ 10	\$ 10
Módulo hx711	1	\$ 10	\$ 10
Driver A4988	1	\$ 3.5	\$ 3.5
Plaquita perforada	1	\$ 1	\$ 1
Fuente dual 12V/5V	1	\$15	\$15
Interruptor	1	\$ 1	\$ 1
Piezas de MDF		\$ 32	\$ 32

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
Piezas impresas en 3D		\$ 30	\$ 30
Rodamientos	2	\$ 3	\$ 6
Gastos adicionales		\$15	15
<b>TOTAL</b>			<b>\$503.5</b>

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

- Se diseñó y construyó un prototipo detector de rotura de flor (piel) para la empresa FAME S.A. del cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha, que reduce el tiempo de operación a un 30% del tiempo inicial y aumenta la precisión de los resultados en las pruebas de control de calidad.
- Mediante un análisis CAD se evaluó la resistencia estructural para el brazo del abrasímetro y las mordazas superiores del flexómetro obteniendo un factor de seguridad 4.2 unidades y una deformación de 0.0004 mm para el brazo, mientras que para las mordazas mostraron un factor de seguridad de 9.57 unidades y deformación de 0.00037 mm. Estos resultados garantizan que los mecanismos no fallarán; considerando su uso continuo en movimiento horizontal y oscilatorio respectivamente, lo que es fundamental para el trabajo adecuado de cada máquina.
- El análisis estático del elastómetro revela que el diseño actual de los elementos de transmisión muestra una deformación de 0.0024 mm y un factor de seguridad de 11.2 unidades en los dientes de los engranes. Aunque Robert L. Mott sugiere un factor de seguridad (entre 4 y 8) bajo cargas dinámicas, el criterio de sobredimensionamiento es aplicable debido al incremento de la vida útil de los elementos.
- La precisión del sensor fuerza resulta fundamental, ya que los valores que registra desempeñan un papel importante en la evaluación de la calidad de cuero cuando no se presenta grietas, para ello, se han usado herramientas de Excel y se ha cuantificado la magnitud de las posibles variaciones en los valores del sensor, en relación con su promedio, contribuyendo a la consistencia de las mediciones con una precisión del 0.4%. Mientras que el sistema de detección proporciona una

efectividad del 74% a la máquina mostrando un nivel aceptable debido a la lógica del algoritmo de detección

- Se concluye que el prototipo desarrollado para detectar la rotura flor ha sido diseñada y construida utilizando materiales y componentes accesibles dentro del país, satisfaciendo así las necesidades y requerimientos de la empresa FAME S.A.
- De acuerdo con las pruebas obtenidas en el ensayo, con un valor de 20 ciclos en modo automático el tiempo aproximado es de 16.1 segundos, a diferencia del modo manual el tiempo que registra es de 51.92 segundos, lo que indica una reducción de tiempo del 30.97% en comparación con el tiempo inicial, lo que respalda la superioridad de la máquina automatizada en lo que respecta a eficiencia y optimización.
- Se realizó un análisis mediante la distribución t-Student, que arroja un valor estadístico calculado de 18.73, significativamente superior al valor crítico de 1.796. Este resultado contundente nos lleva a la conclusión de que no es necesario un análisis adicional para responder de manera afirmativa a la hipótesis planteada, por lo tanto, el sistema automatizado presenta un mejor rendimiento en comparación con la operación manual.

## **Recomendaciones**

- Realizar el ensamblaje de todas las piezas en software de simulación de 3D para verificar interferencias o ajustes entre piezas y evitar un mal mecanizado o una mala impresión 3D.
- Si se decide extender la implementación del sistema para detectar un mayor volumen de muestras, se recomienda incorporar un mecanismo de ajuste automático de umbral de detección.
- Es importante mantener mejoras continuas en la máquina, por ejemplo, se podría considerar un microprocesador con mayor capacidad y el uso de algoritmos de aprendizaje profundo en caso de una futura repotenciación.

- Para reducir las vibraciones se podría considerar parámetros de acabado y post-procesado en las piezas impresas en 3D.
- Se recomienda la implementación de estos sistemas automatizados en el laboratorio de la empresa FAME S.A., ya que su capacidad de agilizar el proceso de pruebas de control de calidad resulta altamente beneficiosa en términos de tiempos de optimización.
- Dada la implementación de la máquina, se deben considerar acciones de mantenimiento preventivo y una guía sobre las acciones a llevar a cabo en caso de que la máquina presente fallos

## Bibliografía

- 5Hertz Electrónica. (2023). *Celdas de carga*. Obtenido de [https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial\\_id=3](https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial_id=3)
- ABRAÍMETRO DE TAMBOR PARA CAUCHO ATS. (s.f.). *IDM*. Obtenido de <https://www.idmtest.com/productos/abrasimetro-de-tambor-para-caucho-ats>
- Adzet, J. (2005). *Química Técnica de Tenerife*. Igualada, España: Romanya-Valls.
- AGelectronica. (01 de 08 de 2023). *Mercadolibre*. Obtenido de [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-569875653-fuente-conmutada-doble-salida-60w-5v4a-12v3a-htd-60f-a-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-569875653-fuente-conmutada-doble-salida-60w-5v4a-12v3a-htd-60f-a-_JM)
- Alva Alarcón, J. L., & Acorta Santisteban, N. F. (2020). *Sistemas Embebidos Guía metodológica para desarrollarlos*. Trujillo, Perú.
- Arturo, F. (2013). Python 3 al descubierto . En Alfaomega. Mexico : Grupo Editor, S.A de C.V.
- AUDACES. (12 de Octubre de 2022). *Aprende a crear colecciones con los principales tipos de cuero*. Obtenido de <https://audaces.com/es/blog/tipos-cuero>
- Autycom. (2023). *Innonación Inteligente* . Obtenido de <https://www.autycom.com/que-es-un-sistema-hmi/>
- Borja Ramírez, V. (1999). Método de diseño para variedad de productos basados en el análisis de sus modularidad. Distrito Federal: Ingeniería. Investigación y Tecnología.
- Brito, H. (2023). *Microcontroladores*. Obtenido de <http://hugobrito.net/arquitecturateoria/definicionmicrocontroladores.html>
- Cadena Zurita, O. L. (2013). Control automatizado de órdenes de producción y recetas químicas en la Tenerife Ecuapiel. Ambato: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Calle, Á. S. (2005). Aplicaciones de la visión artificial y la biometría informática. En Á. S. Calle. Universidad Rey Juan Carlos: Dykinson.

Cerpa, F. (08 de 05 de 2023). *Grabcad*. Obtenido de <https://grabcad.com/library/diferencial-8>

Chérrez Escobar, P. F. (2022). Diseño de un sistema de costos p[or procesos en la Tenería Ecuapiel de la ciudad de Ambato.

Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2014). *Sensores y actuadores aplicaciones con Arduino* (Primera ed.). México: GRUPO EDITORIAL PATRIA , S.A. DE C.V. Recuperado el 18 de Julio de 2022

Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. M. (2016). *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino*. Azcapotzalco, México D.F.: Patria S.A.

Cowan dynamics. (13 de Noviembre de 2020). *Actuadores de válvulas rotativas*. Obtenido de <https://www.cowandynamics.com/es/actuadores-rotativos-para-valvulas/#:~:text=Un%20actuador%20de%20v%C3%A1lvula%20rotativa,lo%20que%20el%20cliente%20necesite.>

EPA. (s.f.). *Electrónica Práctica Aplicada* . Obtenido de <https://www.diarioelectronico hoy.com/blog/descripcion-del-driver-a4988>

FAME. (2022). Obtenido de <https://www.fame.ec/empresa/>

Foundation, R. (06 de septiembre de 2014). *Raspberrypi.org*. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/help/what-%20is-a-raspberry-pi/>

GESTER. (s.f.). Obtenido de <http://testsolution4u.com/4-2-5-bally-leather-flexing-tester/184189/#>

IDM. (s.f.). Obtenido de <https://www.idmtest.com/productos/maquina-universal-de-ensayos>

IMPORMEL . (s.f.). *IMPORTADORA*. Obtenido de <http://impormel.com/equipos-de-medicion/1431-microscopio-digital-usb-hasta-1000x-pc-android-video-camara.html>

Interempresas. (s.f.). *Metalurgia*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/265735-Tomografia-computarizada-como-metodo-de-ingenieria-inversa.html>

ISO. (2011).

ISO. (2011). *Determination of flex resistance* . Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:5402:-1:ed-1:v1:en:sec:4.9>

ISO. (2015). Obtenido de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/63871/2a85fa5ffe33461f97ffa7c03ec46a02/ISO-3379-2015.pdf>

ISO. (2016). Obtenido de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:3379:ed-2:v1:en>

ISO. (2018). Obtenido de <https://www.iso.org/standard/63230.html>

Juan Humberto Sossa Azuela, R. R. (2011). *Procesamiento y análisis digital de imágenes*. Ra-Ma S.A. .

Lara, S. (2017). *Igus*. Obtenido de *Actuadores lineales, tipos y cómo escoger el adecuado*: <https://www.igus.es/info/actuadores-lineales>

Luis Llamas . (s.f.). Obtenido de <https://www.luisllamas.es/motores-paso-paso-arduino-driver-a4988-drv8825/>

Mactrónica. (2014). *Electronica y Tecnologia desde 2014*. Obtenido de <https://www.mactronica.com.co/celda-de-carga-50kg>

Mapro. (2023). Obtenido de <https://maprosensor.com/dinamometros-sensores-carga>

- MecatrónicaLATAM. (2021). *Motores paso a paso*. Obtenido de <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/motor-paso-a-paso/>
- Megatronica.cc. (03 de Enero de 2022). *Robótica, Electrónica y Computación Ingeniería*. Obtenido de <https://megatronica.cc/producto/pantalla-touch-5-pulgadas-800480-tft-lcd-hdmi-raspberry-pi/>
- Mínguez, T. D. (2021). En *Visión artificial : aplicaciones prácticas con OpenCV-Python* (pág. 388). Marcombo.
- Misumi. (08 de 04 de 2023). Obtenido de <https://mx.misumi-ec.com/es/vona2/result/?Keyword=nema&isReSearch=0>
- Muever. (s.f.). *Elastómetro electrónico Mod.5077-E*. Obtenido de <https://www.muver.com/maquina.php?maquina=175>
- NAYLAMP MECHATRONICS. (s.f.). *DRIVER PAP POLOLU A4988 1A*. Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/driver-pap-stepper/63-driver-pap-pololu-a4988.html>
- Neoattack. (06 de Noviembre de 2018). *Arte y Cuero*. Obtenido de <https://www.arteycuero.com/cuero-vaca/>
- Nisbett, R. G. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica*. S.A. DE C.V.
- Ozapato. (24 de Abril de 2020). *¿Qué es una piel hidrofugada?* Obtenido de <https://ozapato.com/do/que-es-una-piel-hidrofugada/>
- PCE INSTRUMENTS. (s.f.). *Microscopio USB PCE-MM 800*. Obtenido de <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-optico/microscopio-pce-mm200.htm>

- Pololu Robotics Electronics. (08 de 07 de 2023). *Portador de controlador de motor paso a paso A4988*. Obtenido de <https://www.pololu.com/product/1182>
- Rambal Automatización y Robótica*. (s.f.). Obtenido de <https://rambal.com/raspberry/736-pantalla-raspberry-pi-5-in.html>
- Ramos Acosta, D. A. (2013). Uso de la ingeniería inversa como metodología de enseñanza en la formación para la innovación.
- RaspberryPi.org. (Junio de 2019). *Raspberry Pi 4 Computer Model B*. Obtenido de <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-4-Product-Brief.pdf>
- Rossum, G. v. (2000). Guía de aprendizaje de Python. *Release 2.0*, Guido van Rossum.
- Rubio, A. (23 de Mayo de 2019). Obtenido de Actuadores eléctricos y sus funciones principales: <https://www.instrumentaciondigital.es/actuadores-electricos-y-sus-funciones/>
- TECmikro. (16 de Septiembre de 2015). *Motor Nema 17*. Obtenido de <https://tecmikro.com/motores/412-motor-nema-17.html>
- TESTEX. (2022). *TF116 Probador de Flexibilidad de Bally* . Obtenido de <https://www.testertextile.com/es/producto/probador-de-resistencia-a-la-flexi%C3%B3n-tf116/>
- TESTEX Our Instruments* . (s.f.). Obtenido de <https://www.testertextile.com/es/producto/probador-de-resistencia-a-la-flexi%C3%B3n-tf116/>
- TSTinstruments*. (s.f.). Obtenido de <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.tstinstruments.com%2Fmanufacturer-for-lultcs-leather-abrasion-tester-coated-material-astm-d3884-taber-wear-tester-leather-abrasion-resistance-test-tst-product%2F&psig=AOvVaw2izqCWTbFYG9Jh9S7ANwM0&ust=1>

TSTinstruments. (2022). *TSTinstruments*. Obtenido de

<https://www.tstinstruments.com/es/coated-material-astm-d3884-taber-wear-tester-leather-abrasion-resistance-test-product/>

Vijayaraghavan, S. (2020). *Microprocessor & Microcontroller*.

Zamora, M. C. (2003). *Estadística descriptiva e inferencial*. Lima: Moshera.

**Anexos**